

MAILLARD & MILLET

COSMOGRAPHIE

Classe de Mathématiques

LIBRAIRIE HACHETTE

NOUVEAU COURS DE MATHÉMATIQUES

conforme aux programmes de 1957 et de 1958

publié sous la direction de M. Roland Maillard,
Inspecteur général de l'Instruction publique.

Classe de Sixième : *Mathématiques*, par R. CAHEN
(Un volume de 15,5 × 21 cm.).

Classe de Cinquième : *Mathématiques*, par R. CAHEN
(Un volume de 15,5 × 21 cm.).

Classe de Quatrième : *Mathématiques*, par R. MAILLARD
et E. CARLAP
(Un volume de 15,5 × 21 cm.).

Classe de Troisième : *Mathématiques*, par
R. MAILLARD, R. CAHEN et E. CARLAP
(Un volume de 15,5 cm × 21 cm.).

COURS DE MATHÉMATIQUES

par

ROLAND MAILLARD et ALBERT MILLET

Inspecteur général
de l'Instruction publique.

Professeur au Lycée Janson-de-Sailly
et à l'E. N. S. E. T.

Classes de Seconde classique A et B : *Mathématiques.*
Un volume de 14 × 22 cm.

Classes de Seconde classique C et Moderne :
Algèbre. Un volume de 14 × 22 cm. *Géométrie.* Un volume de 14 × 22 cm.

Classes de Première classique A et B : *Mathématiques.*
Un volume 14 × 22 cm.

Classes de Première classique C et Moderne :
Algèbre et Trigonométrie. Un volume. *Géométrie.* Un volume.

Classe de Mathématiques :
Algèbre. Un volume. *Géométrie.* Un volume.
Arithmétique. Un volume. *Géométrie descriptive.* Un volume.
Cosmographie. Un volume. *Mécanique.* Un volume.
Trigonometrie. Un volume.

Classe de Philosophie :
Cosmographie. Un volume. *Trigonometrie-Algèbre.* Un volume.
Mathématiques. (Trigonometrie-Algèbre et Cosmographie) en un volume.

Classe de Sciences expérimentales :
Cosmographie. Un volume.
Mathématiques (moins la Cosmographie). Un volume.

CLASSIQUES HACHETTE

ENSEIGNEMENT DU SECOND DEGRÉ

Roland MAILLARD

Inspecteur général
de l'Instruction publique.

Albert MILLET

Professeur au Lycée Janson-de-Sailly
et à l'E. N. S. E. T.

COSMOGRAPHIE

AVEC 94 EXERCICES ET PROBLÈMES
ET 215 FIGURES

CLASSE DE MATHÉMATIQUES

Programmes du 24 Juin 1948

CLASSIQUES
★ ★ ★
HACHETTE

PROGRAMMES DU 24 JUIN 1948

Classe de Mathématiques.

Cosmographie.

1° Le Ciel et les constellations. — Sphère céleste locale; verticale et horizon. Coordonnées horizontales : azimut et hauteur. Théodolite.

Lois du mouvement diurne (explication par la rotation de la Terre); équatorial. Sphère des fixes; axe du monde; équateur céleste. Méridien astronomique; points cardinaux.

Angle horaire d'une étoile; temps sidéral. Coordonnées célestes équatoriales : ascension droite et déclinaison. Instrument méridien.

2° La Terre. — Coordonnées géographiques; longitude et latitude. Forme et dimensions du géoïde; nivellement.

Représentation plane d'un hémisphère terrestre en projection orthographique et en projection stéréographique. Notions sommaires sur les projections de Mercator et de Lambert.

3° Mouvements apparents du Soleil sur la sphère des fixes; écliptique. Coordonnées écliptiques; longitude et latitude célestes. Mouvement diurne du soleil; inégalité des jours et des nuits aux diverses latitudes; crépuscules.

Saisons. Précession des équinoxes. Année sidérale et année tropique. Calendriers.

Temps solaire vrai. Temps moyen; temps universel (T. U.); temps légal; fuseaux horaires.

4° Le système solaire. Les planètes. — Système de Copernic; lois de Képler; loi de Newton. Comparaison avec le système de Ptolémée.

Les planètes principales. Mouvement apparent géocentrique sur la sphère des fixes. Distances moyennes des planètes au Soleil. Parallaxe du Soleil. Dimensions du Soleil et des planètes. Description physique des planètes.

Comètes. Météores et météorites.

5° La Lune. — Son mouvement diurne; son mouvement apparent sur la sphère des fixes; révolution sidérale.

Phases de la Lune; révolution synodique.

Mouvement de la Lune par rapport à la Terre; parallaxe, distance moyenne, diamètre apparent.

Rotation de la Lune. Libration.

Description physique de la Lune.

Éclipses de Lune et de Soleil. Le saros.

6° Constitution physique du Soleil : photosphère, taches, chromosphère, protubérances, éruptions solaires, couronne solaire. Spectre solaire. Température du Soleil.

7° Les étoiles. — Leurs distances à la Terre. Notions de photométrie et de spectroscopie stellaires. Magnitude apparente et magnitude absolue. Couleur et température. Étoiles naines, étoiles géantes.

Étoiles doubles; masse des étoiles.

Étoiles variables. Céphéïdes. Novae.

8° La galaxie. — Nébuleuses galactiques et extra-galactiques. Matière interstellaire.

© Librairie Hachette, 1952.

Tous droits de traduction, de reproduction
et d'adaptation réservés pour tous pays.

PRÉFACE

ON ne saurait sous-estimer l'importance de l'Astronomie. Tous les phénomènes terrestres sont tributaires de cette « mère des sciences ». Notre vie est réglée par le Soleil; les jours et les nuits, les divisions du temps, les saisons, le cycle de la végétation, les zones de la Terre dépendent de cet astre dont les moindres évolutions pourraient être, pour les hommes, des questions de vie ou de mort. La géodésie, la géographie, la navigation (maritime et aérienne), la météorologie doivent certains de leurs progrès à des connaissances astronomiques de plus en plus précises. Le mouvement des astres et la prévision des phénomènes célestes ont posé aux mathématiciens les problèmes les plus ardu; les solutions données ont souvent forcé l'admiration universelle.

Mais ce ne sont pas les notions, nécessairement sommaires, exposées dans quelques leçons de Cosmographie en classe de Mathématiques, qui peuvent suffire à un géodésien, à un navigateur, à un futur astronome. L'astronomie est trop complexe, elle utilise des méthodes de calcul trop délicates, des appareils trop imposants, des connaissances de physique et de chimie trop variées, pour qu'on puisse donner à cet enseignement un caractère utilitaire — en dehors de la nécessité de traiter un programme précis et sagement limité.

Nous ne saurions oublier cependant que les « énigmes de l'Univers » ont toujours hanté l'imagination des hommes, des plus simples comme des plus savants. L'histoire de l'Astronomie, de ses théories et de ses hypothèses successives, de ses réussites souvent grandioses, de ses limites même, est l'histoire la plus passionnante, car c'est aussi celle des progrès de l'esprit humain.

Il faudrait, pour donner à cet exposé toute la valeur scientifique et philosophique qu'il pourrait comporter, un développement inadmissible dans un manuel d'enseignement. Nous sommes partis de l'observation directe, puis de l'hypothèse, pour en déduire les conséquences vérifiables et les applications. C'est la matière proprement dite du Cours.

Nous avons complété cette étude par des exposés relatifs à des problèmes actuels. L'homme ne peut expliquer l'Univers qu'à la lueur de ses connaissances diverses; les mathématiques, mais aussi la physique, la chimie, la géologie, la biologie même contribuent à la science astronomique. En retour, le Ciel offre les ressources d'un laboratoire gigantesque : ses températures et ses pressions, irréalisables ailleurs, produisent des phénomènes que la chimie nucléaire fait à peine entrevoir à l'échelle terrestre. Ces questions, présentées en « lectures » distinctes de la partie proprement scolaire, auront, nous l'espérons, l'attrait d'une étude désintéressée.

En fin de volume, une *bibliographie* indique les ouvrages spécialisés qui ont leur place non seulement dans la bibliothèque de la classe, mais dans celle de tous les jeunes gens curieux de l'évolution des merveilleux développements de la Science.

Un *tableau de valeurs numériques* et un *index alphabétique* faciliteront les recherches et les revisions.

Nous recevrons avec reconnaissance les observations et critiques que nos collègues voudront bien nous exprimer. Nous les en remercions à l'avance.

LES AUTEURS

NOTA. — Les *définitions*, les *abréviations* et les *données numériques* utilisées sont conformes aux données de l'*Annuaire du Bureau des longitudes* pour 1951.

COSMOGRAPHIE

*Nulle beauté ne surpasse celle
du mystérieux.*

EINSTEIN.

CHAPITRE PREMIER

LA SPHÈRE CÉLESTE

- 1. *Observation du Ciel.*
- 2. *Sphère locale. Le mouvement diurne.*
- 3. *Coordonnées horaires. Coordonnées équatoriales.*
- 4. *Description sommaire du Ciel.*

1

OBSERVATION DU CIEL

■ 1. **L'observation et les hypothèses.** — Nous désirons, au début de cette étude sommaire d'Astronomie, ou plus modestement de *Cosmographie* (ce qui veut dire *description du Monde*), faire abstraction de tout ce que nous avons entendu dire sur les mouvements de la Terre ou du Soleil, et nous placer devant un problème qui nous soit complètement inconnu. L'Astronomie est une science d'observation. Nous observerons; nous ferons sur les observations les hypothèses possibles; nous en déduirons les conséquences, et nous retiendrons, en définitive, l'hypothèse que les conséquences justifient, quitte à la modifier plus tard si une nouvelle observation plus précise le rend nécessaire.

C'est la méthode de toutes les sciences d'observation; l'Astronomie nous montrera des exemples remarquables de retouches successives apportées aux hypothèses à mesure que les moyens d'investigation deviennent plus puissants, et les mesures plus précises.

■ **2. Les constellations.** — Choisissons une nuit sans nuages et sans clair de lune. Nous verrons briller une multitude de points lumineux, dont la lumière scintille : ce sont les *étoiles*. Quelques points brillent sans scintiller, d'une lumière plus régulière : ce sont les *planètes*, dont nous ne nous occuperons pas au cours de cette première observation.

Les étoiles forment dans le ciel des figures appelées *constellations*. Ces figures ne varient pas d'une nuit à l'autre; les observateurs les plus anciens, qui en ont dressé des croquis, les ont vues sensiblement comme nous les voyons; elles portent encore les noms qu'ils leur ont donnés. On a l'impression de figures indéformables, *solides*.

Cette impression est confirmée par une observation de longue durée, au cours de la nuit. Les étoiles semblent se déplacer par rapport à des repères pris sur la Terre; mais ce déplacement a lieu en bloc, la forme des constellations n'étant pas changée; les étoiles qui sont alignées à un moment le restent non seulement au cours de la nuit, mais au cours des nuits successives.



Fig. 1.

Précisons par une mesure. L'angle AOB formé par deux directions allant de l'œil O de l'observateur à deux étoiles A et B déterminées, s'appelle la *distance angulaire* de ces étoiles (fig. 1). On peut mesurer cet angle; on constate qu'il ne varie pas au cours des nuits successives.

■ **3. La sphère céleste.** — Quand un observateur se déplace sur la Terre, la même constellation ne change pas d'aspect; la distance angulaire de deux mêmes étoiles reste invariable. A Paris ou à Pékin, la « Grande Ourse » a la même forme, celle d'une casserole (fig. 2), qui est le nom donné par les Chinois.



Fig. 2. — La Grande-Ourse.

Nous en concluons que les dimensions terrestres sont négligeables par rapport à la distance des étoiles. D'ailleurs, les étoiles, qui apparaissent à l'œil nu sous forme de points lumineux, conservent cet aspect de points quand on les examine à la lunette, ce qui prouve que leur éloignement est considérable.

Tout se passe comme si les étoiles étaient accrochées à la surface intérieure d'une sphère solide appelée *sphère céleste*, dont la Terre, réduite à un point, occuperait le centre.

On peut imaginer une sphère matérielle d'un rayon quelconque, dont l'observateur occupe le centre. La droite qui va de l'observateur à l'étoile (ou le rayon lumineux qui va de l'étoile à l'observateur) perce la sphère en un point A, qui sera l'image de l'étoile sur la sphère. La distance angulaire de deux étoiles est l'angle AOB.

Pour repérer la position d'une étoile, sur cette sphère *fixe*, liée à l'observateur, il faut déterminer un système de coordonnées, lié lui-même à l'observateur, c'est-à-dire à des directions prises sur la Terre, au lieu de l'observation.

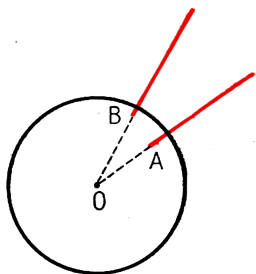


Fig. 3.

- On appelle **sphère locale** une sphère fixe dont le rayon sera pris pour unité; son centre est l'œil de l'observateur. Une direction, déterminée par le centre et un point de cette sphère, sera rapportée à des axes fixes, liés à la sphère locale.

On peut dire que la sphère locale joue, pour déterminer les directions dans l'espace, à partir d'un point donné de la Terre, le rôle que joue un cercle trigonométrique pour déterminer, à partir d'un point donné d'un plan, une direction dans le plan.

Nous allons étudier les différents systèmes de coordonnées qui sont relatifs à la sphère locale.



Photo Sport et General

Observatoire de Greenwich, près de Londres.

2

SPHÈRE LOCALE.

LE MOUVEMENT DIURNE

■ 4. **Verticale et horizontale.** — Pour un observateur sur la Terre, il existe une direction facile à déterminer, c'est la verticale.

● On appelle **verticale** la direction prise par un fil à plomb dans sa position d'équilibre.

La direction de la verticale ascendante, c'est-à-dire s'éloignant de la surface de la Terre, perce la sphère céleste en un point Z appelé le **zénith** du lieu de l'observation. Le point diamétralement opposé N sur la sphère céleste s'appelle le **nadir**.

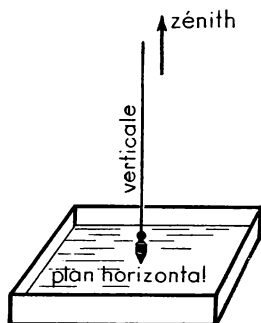


Fig. 4.

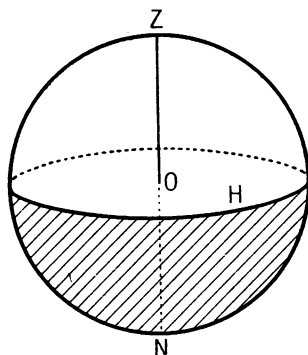


Fig. 5.

● Le **plan de l'horizon** est le plan perpendiculaire en O à la verticale.

Il coupe la sphère céleste suivant un grand cercle (H) appelé l'horizon du lieu (fig. 5).

Nous ne pouvons observer que la partie de la sphère céleste située du côté du zénith par rapport à l'horizon.

● REMARQUES. — 1° Dans une grande plaine, ou sur la mer, le cercle d'horizon apparaît régulier. Dans d'autres lieux, sa régularité est altérée par le relief de la Terre.

2° Dans un observatoire, on détermine le plan de l'horizon à l'aide de la surface libre d'un bain de mercure. La verticale est la direction perpendiculaire à cette surface.

■ 5. **Coordonnées horizontales.** — Soit OA la direction d'une étoile à un moment donné. Le demi grand cercle ZAN, passant par l'étoile et la verticale OZ est dit le **vertical de l'étoile**. Soit (H) le plan de l'horizon, Z le zénith (fig. 6).

● On appelle **hauteur** (h) l'angle formé par la direction OA de l'étoile et le plan de l'horizon.

$$h = \widehat{aOA}.$$

Cet angle est mesuré à partir de l'horizon (0°) vers l'étoile. Il est positif ou négatif suivant que l'astre est au-dessus ou au-dessous de l'horizon.

Pour Z, $h = +90^\circ$; pour N, $h = -90^\circ$. A la hauteur h , on associe la **distance zénithale** (z) qui est l'angle :

$$z = \widehat{ZOA}$$

compté de 0 à 180° à partir de Z.

La distance zénithale est le complément algébrique de la hauteur :

$$h + z = 90^\circ.$$

● On appelle **azimut** (a) l'angle formé par le vertical de l'étoile et par le vertical d'un repère terrestre K.

$$a = \widehat{KOa}.$$

Il se compte de 0 à 360° , à partir de K, de la gauche vers la droite de l'observateur, c'est-à-dire dans le sens *rétrograde*.

La hauteur et l'azimut sont les **coordonnées horizontales**. Elles définissent la position d'un point sur la *sphère locale*. Pour un astre, elles sont variables l'une et l'autre, mais sont directement mesurables.

■ 6. **Théodolite.** — Le **théodolite** est un appareil qui permet la mesure de la hauteur et de l'azimut.

Il se compose essentiellement d'un disque circulaire A représenté en coupe (fig. 7). Ce disque est muni de trois vis calantes qui permettent, sur un support fixe, de le rendre horizontal; le réglage est vérifié à l'aide de niveaux à bulle d'air non représentés sur la figure. Un disque mobile D est monté sur un axe

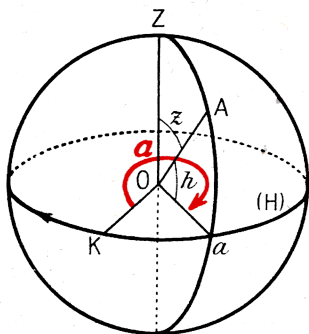


Fig. 6.

vertical V qui peut tourner dans le bâti support de A. Le disque D porte une graduation en degrés, de 0 à 360; quand il tourne cette graduation se déplace devant un repère placé sur le disque A.

Le disque D entraîne dans sa rotation une fourche verticale qui supporte un axe horizontal H sur lequel sont fixés : 1^o une lunette L; 2^o un cercle C solidaire de la lunette. La graduation de ce cercle défile devant un repère porté par la fourche.

Le plan A étant horizontal, on vise l'astre avec la lunette. La distance zénithale est donnée par une lecture sur le cercle C.

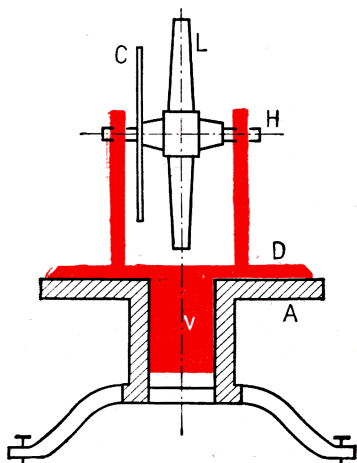


Fig. 7. — Théodolite.

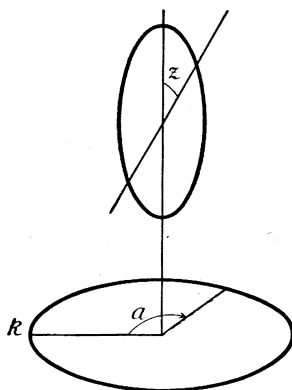


Fig. 8.

L'angle dont il faut faire tourner le disque D pour viser ensuite le repère terrestre K donne l'azimut, par une différence de deux lectures.

Les angles sont déterminés à 1 minute près à l'aide de verniers.

■ **7. Observation du mouvement diurne.** — Observons le Ciel pendant plusieurs nuits consécutives. Nous supposons uniquement que les observations sont faites dans la région que nous habitons (hémisphère nord de la Terre).

1^o En regardant vers le Sud, indiqué par une boussole, nous observerons une étoile qui se trouve près de l'horizon vers notre gauche au début de l'observation. Nous allons mesurer à des intervalles réguliers (toutes les heures par exemple) son azimut et sa hauteur.

Nous la verrons se déplacer de notre gauche vers notre droite; sa hauteur croît d'abord, atteint un maximum, puis décroît. L'étoile se rapproche de l'horizon, puis disparaît. Nous l'avons

suivie ainsi depuis son lever ($h = 0$) jusqu'à son coucher ($h = 0$), en passant par le point de sa plus grande hauteur ou *culmination*.

Prenons l'azimut a_1 correspondant à la hauteur h , dans le mouvement ascendant; bloquons alors la lunette du théodolite autour de l'axe H et attendons le moment où l'étoile, dans son mouvement descendant, reprendra la même hauteur; elle aura alors un azimut a_2 .

Si nous traçons sur le sol l'angle $\widehat{a_1 O a_2}$ défini par ces deux directions, nous constaterons que la bissectrice OS de cet angle (fig. 9) est fixe, quelle que soit la première valeur a , et quelle que soit l'étoile considérée.

La direction OS définit donc, avec la verticale de O, un plan vertical fixe qui est un plan de symétrie de la figure. Les culminations des étoiles ont lieu dans ce plan, que l'on appelle le *plan méridien* du point O.

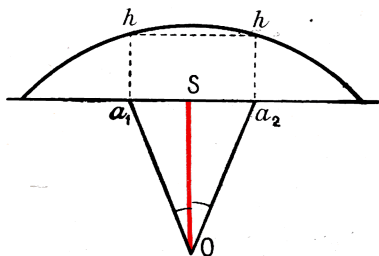


Fig. 9.

2° La direction OS étant établie, on note l'heure de passage d'une étoile dans le plan méridien.

Le lendemain et les nuits suivantes, nous noterons encore l'heure de passage de la même étoile, que nous aurons repérée soigneusement. Nous constaterons qu'entre deux passages successifs au plan méridien, il s'écoule un intervalle constant d'environ 23 h 56 mn (de nos horloges).

3° Observons maintenant dans la direction opposée à S. Nous verrons alors le déplacement des étoiles s'effectuer dans le sens *direct*, ce qui résulte de notre retournement. Quelques-unes n'ont ni lever ni coucher; elles sont toujours au-dessus de l'horizon, et passent deux fois dans l'intervalle de 23 h 56 mn dans le plan du méridien, à leur culmination ou *passage supérieur*, correspondant à la plus grande hauteur (h_m) et à leur *passage inférieur*, correspondant à la plus petite hauteur (h_m). Nous pouvons faire cette observation, en particulier, sur les étoiles de la Grande Ourse, et nous trouverons, quelle que soit l'étoile choisie que :

$$\frac{h_m + h_m}{2} = \varphi.$$

φ est un nombre constant, pour une position donnée de l'observateur.

Ces étoiles, qui restent toujours au-dessus de l'horizon d'un lieu d'observation, sont dites *circumpolaires*.

4° Nous observerons d'ailleurs une étoile dont la hauteur est voisine de φ et qui reste sensiblement fixe pendant la nuit :

c'est l'*étoile Polaire*; on la reconnaît facilement par son alignement avec les deux étoiles α et β de la Grande Ourse (fig. 10). Elle n'est pas la plus brillante du Ciel, mais elle est plus brillante que celles qui l'avvoisinent.

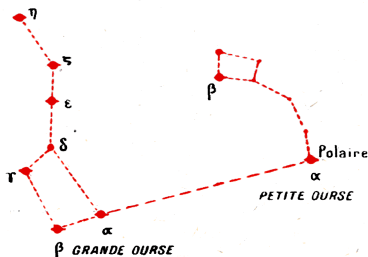


Fig. 10.

5° Nous compléterons ces observations par une photographie. Disposons un appareil à

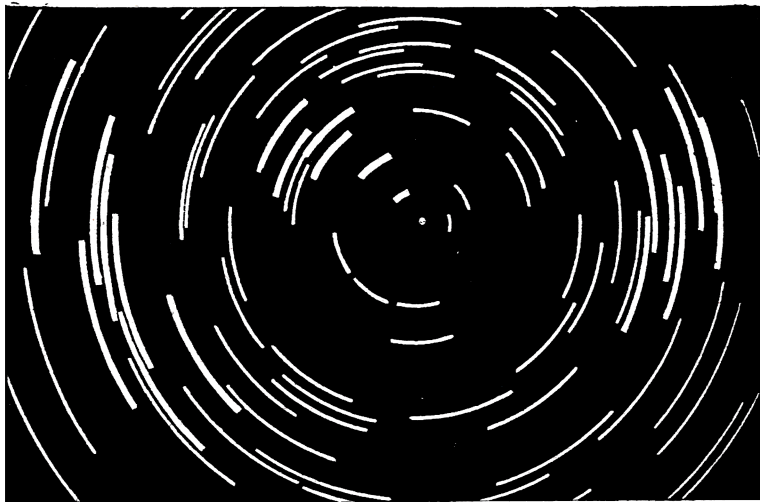


Fig. 11. — Rotation autour du pôle Nord.
Dessin d'après une photographie de 2 heures de pose.

plaques sur un support stable, de façon que l'image de l'étoile polaire se fasse sensiblement au centre de la plaque.

Nous ouvrirons alors l'obturateur et ferons une pose de 2 heures. Le cliché obtenu (fig. 11), après développement, donne des arcs de cercles concentriques, de 30° chacun. En prenant le calque du début et de la fin de chaque arc, nous aurons les positions successives des étoiles d'une même constellation, et son mouvement de rotation autour d'un centre fixe apparaîtra clairement (fig. 12).

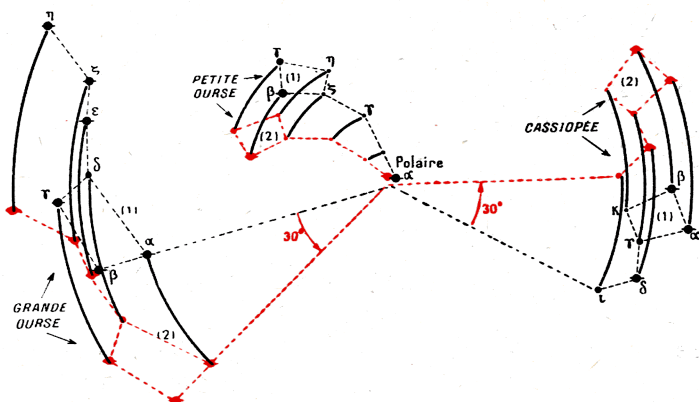


Fig. 12. — La rotation autour du pôle Nord.

Trois constellations ont été mises en évidence, au début et à la fin de la pose.

■ **8. Axe du monde.** — Des observations qui précèdent, nous sommes amenés à conclure que l'ensemble de la sphère céleste tourne d'un mouvement uniforme, et qu'elle accomplit sa rotation autour d'un axe fixe, en 23 h 56 mn environ.

- On appelle **axe du monde** l'axe autour duquel se fait la rotation de la sphère céleste.

Si un observateur est placé sur cet axe de façon que le mouvement lui apparaisse rétrograde, l'axe est alors orienté, dans le sens des pieds vers la tête de l'observateur. L'axe perce la sphère céleste en deux points : le **pôle boréal** (voisin de l'étoile polaire), le **pôle austral**, qui est son opposé.

- L'**équateur** de la sphère céleste est le grand cercle perpendiculaire à l'axe du monde.
- Le **méridien astronomique** d'un lieu est le plan déterminé par l'axe du monde et la verticale du lieu.

C'est dans ce plan que les étoiles culminent.

Le méridien d'un lieu coupe la sphère céleste suivant un grand cercle constitué par deux verticaux. Un de ces verticaux contient le pôle boréal; il coupe l'horizon du lieu en un point appelé **Nord**. Le point diamétralement opposé de l'horizon est le **Sud**.

Le Nord et le Sud partagent l'horizon en deux demi-cercles. On partage chaque demi-cercle en quadrants par les points appelés **Est** et **Ouest**. Si nous regardons le Nord, nous avons l'Est à notre droite, l'Ouest à notre gauche, le Sud derrière nous.

● **Le Sud** est choisi par les astronomes comme **origine des azimuts**.

Dans ces conditions, les azimuts des 4 directions que nous venons de définir sont .

Sud : 0° ; Ouest : 90° ; Nord : 180° ; Est : 270° .

Ces 4 directions sont les **points cardinaux** du lieu.

● **La hauteur du pôle** au-dessus de l'horizon est la **semi-somme** des hauteurs d'une étoile circumbolaire à ses passages supérieur et inférieur au méridien.

Cette hauteur est variable suivant le lieu de l'observation.

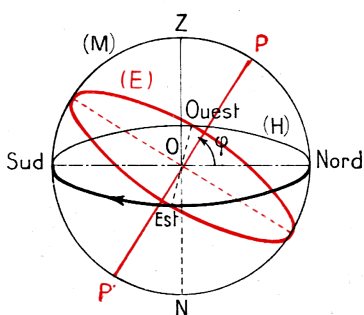


Fig. 13.

On trouve à Paris $48^\circ 50'$; à Alger $36^\circ 47'$ pour la hauteur du pôle boréal. On la représente par la lettre φ .

Nous compléterons alors la représentation de la *sphère locale*. A la ligne verticale ZN, perpendiculaire à l'horizon (H), nous associerons la ligne des pôles PP', perpendiculaire à l'équateur (E). Le plan POZ contient le méridien M. Les points cardinaux sont indiqués sur l'horizon (fig. 13).

■ **9. Lois du mouvement diurne.** — Nous pouvons alors énoncer les lois du mouvement diurne :

1^o Le mouvement diurne est un mouvement de **rotation** des étoiles autour de l'axe du monde.

2^o Ce mouvement est **rétrograde** pour un observateur placé le long de l'axe du monde, la tête du côté du pôle boréal.

3^o Chaque étoile, dans ce mouvement, décrit un **parallèle** de la sphère locale.

Une étoile est visible tant qu'elle se trouve au-dessus de l'horizon (si la présence de la Lune la nuit, du Soleil le jour et des nuages en tous temps ne gêne pas l'observation).

4^o Le mouvement est uniforme et s'accomplit en 23 h 56 mn environ. Nous appellerons provisoirement cette durée le **jour sidéral**.

Nous représenterons très bien ce mouvement si nous consi-

dérons une sphère locale réduite à deux cercles métalliques dans deux plans perpendiculaires : l'un M est le méridien, l'autre H est l'horizon (fig. 14).

Une autre sphère, sur laquelle sont dessinées les étoiles, est mobile à l'intérieur de la première : c'est la *sphère des fixes*. Nous la placerons de façon que l'axe PP' fasse avec la ligne ZN l'angle $90^\circ - \varphi$ (distance zénithale du pôle boréal). En faisant tourner cette sphère à l'intérieur de la première, autour de PP', dans le sens convenable, un observateur placé en O voit le mouvement apparent des étoiles, tout ce qui est au-dessous du plan H étant supposé invisible.

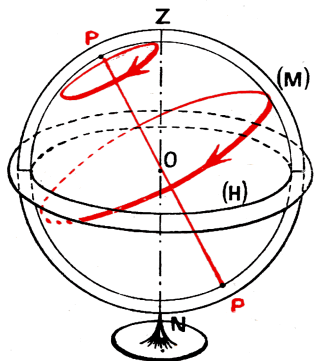


Fig. 14

■ 10. Apparence du mouvement diurne en divers points de la terre.

— Nous pouvons maintenant comprendre ce que nous avons observé et prévoir ce qui peut être observé en d'autres lieux de la terre.

1° A Paris, le pôle céleste boréal (B) est au-dessus de l'horizon (H). Le vertical ZBN coupe l'horizon au point Nord. La figure 15 montre les autres points cardinaux et le cercle trajectoire d'une étoile circumpolaire E sur la sphère locale.

La flèche marque le sens du mouvement diurne.

L'étoile F ne décrit que la partie du parallèle située au-dessus de l'horizon (H). Elle se lève en L et se couche en C. Nous devons

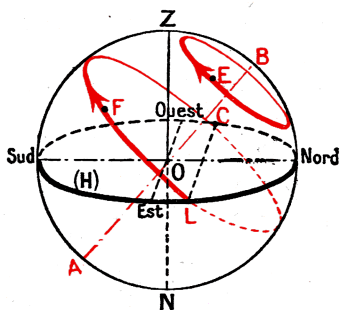


Fig. 15.

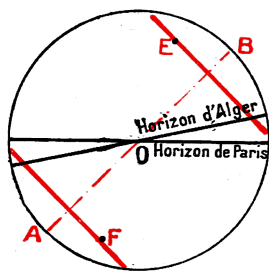


Fig. 16.

penser que des étoiles sont toujours invisibles pour nous : ce sont les étoiles circumpolaires australes situées au-dessous de l'horizon.

2° Si nous descendons vers le Sud, sur la Terre, la hauteur du pôle B diminue (de 12° de Paris à Alger). Des étoiles qui sont circumpolaires à Paris ne le sont plus à Alger (Etoile E, fig. 16), des étoiles invisibles à Paris deviennent visibles à Alger (Etoile F, fig. 16). On voit, sur cette figure, que la sphère locale à Alger ne sera pas la même qu'à Paris; le pôle est plus près de l'horizon à Alger qu'à Paris.

3° En descendant encore vers le Sud, nous atteindrons un point où le pôle est sur l'horizon. Toutes les étoiles sont visibles et ont un lever et un coucher. Il n'y a plus d'étoiles circumpolaires (fig. 17).

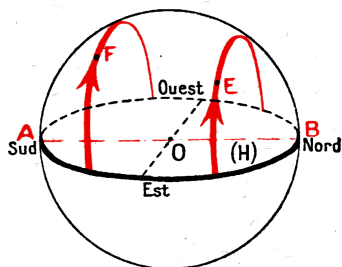


Fig. 17.

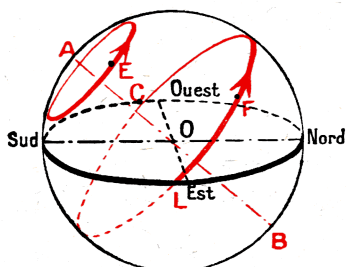


Fig. 18.

4° Continuons notre voyage vers le Sud. Le pôle boréal passe au-dessous de l'horizon et c'est le pôle austral qui apparaît. Nous verrons alors des étoiles circumpolaires australes (E) et des étoiles qui se lèvent à l'Est et se couchent à l'Ouest (F, fig. 18).

5° Si nous atteignons le point de la terre où le pôle B est confondu avec le zénith, toutes les étoiles visibles sont circumpolaires et restent toujours à la même hauteur au-dessus de l'horizon (fig. 19). Mais les points cardinaux ne sont plus définis. Toutes ces prévisions sont vérifiées quand on se déplace sur la Terre.

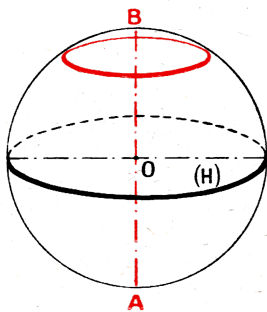


Fig. 19.

■ 11. Rotation de la Terre. — Les lois du mouvement diurne peuvent s'expliquer de deux façons :

1° La sphère des fixes tourne dans le *sens rétrograde* autour de l'axe du monde, la Terre étant immobile.

2° La sphère des fixes est immobile et c'est la Terre qui tourne autour d'un axe, en un jour sidéral, dans le *sens direct*. L'axe du monde serait alors l'axe de rotation de la Terre.

Les anciens avaient adopté l'hypothèse de la Terre fixe et de la rotation de la sphère céleste. Sans doute, HÉRACLIDE, contemporain de Platon et d'Aristote « fait tourner la Terre sur elle-même tandis que le Ciel est en repos ». Mais il ne fut pas suivi.

Ce n'est qu'au XVI^e siècle, avec COPERNIC¹, que l'hypothèse de la rotation de la Terre fut émise et s'imposa à l'attention. Elle est maintenant indiscutable.

1° Tous les astres que nous pouvons observer tournent sur eux-mêmes : le Soleil, la Lune, les planètes. Le mouvement de rotation est donc courant. Mais il n'a été observé qu'à partir du XVII^e siècle.

2° Le renflement équatorial de la Terre, mis en évidence au XVIII^e siècle, résulte de la rotation de la Terre. Cette rotation crée une force centrifuge qui, à une époque ancienne, a provoqué ce renflement.

3° La rotation de la Terre a été prouvée, au XIX^e siècle, par les expériences de FOUCAULT.

Un pendule (P) suspendu à l'extrémité d'un petit axe vertical A, oscille dans un plan déterminé par la verticale de A et la position initiale P₀ du pendule, supposé lâché sans vitesse initiale.

Si, le pendule oscillant, on fait tourner l'axe A sur lui-même, le plan d'oscillation du pendule ne change pas, même si la masse P du pendule tourne sur elle-même. Cette expérience, facile à réaliser, établit la fixité du plan d'oscillation, même dans le cas de rotation du support.

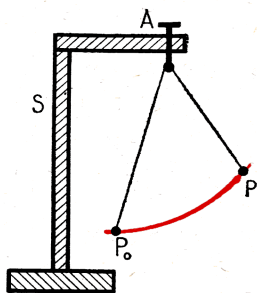


Fig. 20. — Un pendule.

Le plan d'oscillation reste fixe si l'axe A de suspension tourne.

Imaginons que l'on installe ce pendule au Pôle Nord de la Terre. Le plan d'oscillation reste fixe. Or le sol tourne dans le sens direct autour de la verticale qui est ici l'axe de la Terre. Les repères terrestres que l'on peut observer tourneront donc autour du plan d'oscillation et on aura l'impression que c'est ce plan qui tourne autour de la verticale, en un jour sidéral.

L'expérience a été faite par FOUCAULT², non pas au Pôle mais

1. COPERNIC (Nicolas), astronome polonais (1473-1543).

2. FOUCAULT, physicien français (1819-1868).

à Paris, en 1851, sous la coupole du Panthéon. On peut la voir réalisée en permanence au Conservatoire des Arts et Métiers. La théorie en est un peu plus complexe qu'au Pôle, parce que la verticale, qui reste dans le plan d'oscillation du pendule, tourne elle-même avec la Terre. On a démontré que la rotation complète du plan d'oscillation devait s'effectuer en 32 heures à Paris. C'est ce que l'expérience confirme¹.

L'emploi du gyroscope, inventé par Foucault également, et dont le plan de rotation reste fixe, permet aussi de mettre en évidence la rotation de la Terre (voir page 30).

En définitive, nous retiendrons l'hypothèse suivante relative au mouvement diurne :

La terre tourne sur elle-même en 23 h 56 mn environ, de l'Ouest vers l'Est (sens direct) autour d'un axe fixe par rapport à elle-même et qui la perce en deux points fixes, qui sont ses pôles (Nord et Sud).

Cet axe, prolongé indéfiniment, rencontre la sphère céleste auprès de l'étoile polaire (pôle boréal) et au pôle austral.

Le mouvement des étoiles de l'Est vers l'Ouest (sens rétrograde) est un mouvement apparent.

■ 12. Instrument équatorial. — Le mouvement diurne rend l'observation d'une étoile à la lunette presque impossible, parce

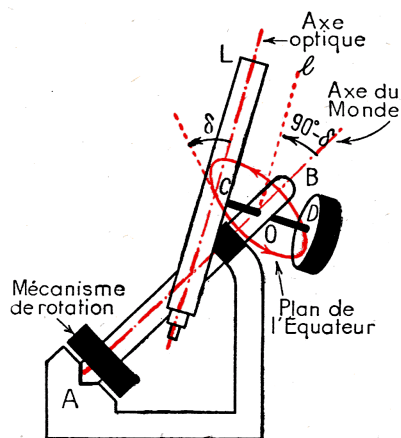


Fig. 21.

qu'elle traverse très rapidement le champ de l'appareil, d'autant plus vite qu'elle est plus loin du pôle. Ainsi, une étoile située près de l'Équateur traverse en 7 à 8 secondes le champ d'une grosse lunette. On obvie à cet inconvénient par le montage de l'instrument de visée en **équatorial**.

Un axe AB est parallèle à l'axe du monde; il peut tourner sur lui-même, entraîné par un mécanisme d'horlogerie; il fait un tour complet

en un jour sidéral. Il porte à son extrémité supérieure un axe

1. En un lieu où la hauteur du pôle est φ , on établit que la durée de la rotation du plan d'oscillation est égale à $\frac{24 \text{ heures}}{\sin \varphi}$.

CD qui lui est perpendiculaire, et qui reste donc, dans la rotation, dans le plan de l'équateur (fig. 21).

L'extrémité C de cet axe porte la lunette L; l'autre extrémité D porte une masse qui équilibre le poids de la lunette.

Si l'on vise une étoile, il suffit de bloquer la lunette de façon à maintenir constant l'angle BOI formé par la direction OI de l'axe optique de la lunette et la direction du pôle. On met l'appareil en mouvement. L'étoile est alors suivie par la lunette.

Tous les observatoires contiennent des instruments équatoriaux, soit télescopes, soit lunettes. La figure 22 montre le grand équatorial de l'observatoire de Meudon sous sa coupole. La coupole et l'observateur tournent en même temps que l'équatorial.

Muni d'un appareil photographique, l'équatorial permet de prendre des clichés d'une région du ciel avec une pose aussi longue que l'on voudra, car le mouvement de rotation continuant pendant le jour, la même portion du ciel se trouvera visible dans l'instrument la nuit suivante.

Ces appareils ne sont pas destinés à faire des mesures d'angles, mais des observations prolongées. Aussi ne voit-on pas de cercles gradués qui leur soient adjoints, comme au théodolite. La fixité de l'image de l'étoile est la confirmation des lois du mouvement diurne.

EXERCICES

1. — Déterminer le plan méridien d'un lieu choisi comme centre d'observation. Tracer la ligne Nord-Sud.

2. — Observer la région circumpolaire, un soir de bonne visibilité, à trois heures d'intervalle, et dessiner les trois constellations de la fig. 12 en les situant par rapport au plan méridien, d'abord repéré.

3. — Observer la rotation des étoiles en regardant vers le Sud, puis cette rotation en regardant vers le Nord. Les deux mouvements apparents ont-ils lieu dans le même sens, par rapport à l'observateur?

4. — Si nous sommes sur la partie de la Terre où le pôle austral est visible, et si nous regardons ce pôle, de quel côté voyons-nous l'Est? l'Ouest?

5. —

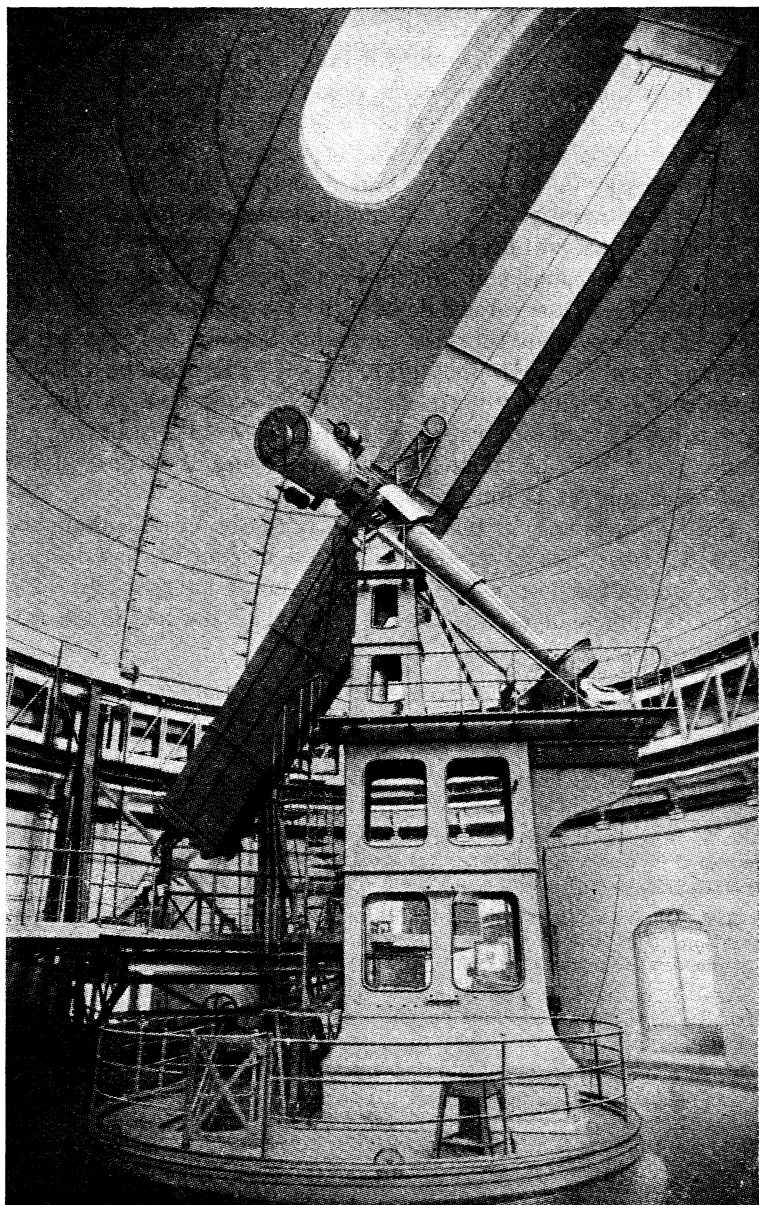
*Ou, penchés à l'avant des blanches caravelles,
Ils regardaient monter, en un Ciel ignoré,
Du fond de l'Océan des étoiles nouvelles.*

(HEREDIA : *Les Conquérants.*)

Expliquer ces vers. Si les conquérants se déplaçaient seulement vers l'Ouest, recherchant...

Les bords mystérieux du monde occidental,

pouvaient-ils voir des étoiles nouvelles? Comment faut-il comprendre leur déplacement pour justifier les deux derniers vers?



Phot. R. Servajean.

Fig. 22. — Lunette équatoriale de l'observatoire de Meudon.

Cette lunette est double; elle comporte un objectif visuel de 83 cm de diamètre et un objectif photographique de 62 cm.

3

COORDONNÉES HORAIRES.
COORDONNÉES ÉQUATORIALES

■ **13. Coordonnées horaires.** — Le système de coordonnées horizontales est défini par rapport au zénith; ce sont des coordonnées variables. Mais nous avons maintenant, sur la sphère locale, une autre direction déterminée, qui est celle des pôles célestes. Elle permet de définir de nouvelles coordonnées.

Soit OZ la verticale, PP' l'axe du monde. Le méridien passe par P , O , Z , et découpe sur le plan de l'horizon les points Nord (N) et Sud (S). L'équateur, perpendiculaire en O à PP' , coupe le méridien en M et M' ; il coupe l'horizon aux deux points cardinaux Est (E) et Ouest (W) (fig. 23).

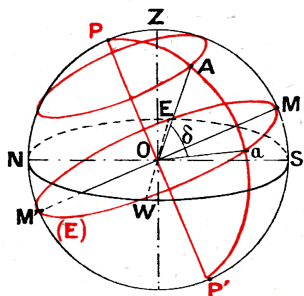


Fig. 23.

Soit A une étoile qui décrit, sur la sphère locale, un parallèle, perpendiculaire à PP' .

On appelle **cercle horaire** de A le demi grand cercle PAP' . Il coupe l'équateur en a .

La position de l'étoile A sur la sphère locale est déterminée si l'on connaît :

- 1° l'angle d'un demi-méridien fixe et du cercle horaire de A ;
- 2° l'angle des directions Oa et OA .

● On appelle **angle horaire** (H) d'une étoile, à un instant donné, l'angle de son cercle horaire et du demi-méridien limité à la ligne des pôles et contenant le zénith.

Dans notre hémisphère, c'est le demi-méridien passant par le Sud.

$$H = \widehat{MO\alpha}.$$

L'angle horaire est compté *dans le sens rétrograde*, c'est-à-dire dans le sens du mouvement diurne, de 0 à 360° . Par suite, cet angle, mesuré par l'arc Ma , croît depuis le passage de l'étoile au méridien.

Le point a décrit l'équateur en 24 heures sidérales, soit 15° par heure. Pour cette raison, l'angle de 15° sera une nouvelle unité d'angle qu'on appelle **l'heure**.

Ainsi, à son passage supérieur au méridien, l'angle horaire

de l'étoile est 0 h; quand il est 2 h 44 mn, il pourra s'exprimer en degrés par :

$$30^{\circ} + 15^{\circ} \times \frac{44}{60} = 30^{\circ} + 11^{\circ} = 41^{\circ}.$$

● On appelle **déclinaison** (δ) l'angle formé par la direction de l'étoile et le plan de l'équateur.

$$\delta = \widehat{aOA}.$$

Cet angle est compté en degrés à partir de l'équateur, positivement vers le pôle boréal, négativement vers le pôle austral, c'est l'angle aOA de la figure 23. La déclinaison du pôle boréal est donc $+ 90^{\circ}$, celle du pôle austral est $- 90^{\circ}$.

Les coordonnées horaires du zénith sont :

$$H = 0; \quad \delta = \varphi,$$

φ étant la hauteur du pôle au-dessus de l'horizon.

Si l'axe polaire est fixe, la déclinaison est constante pour une étoile donnée.

■ 14. **Coordonnées équatoriales.** — Si nous considérons non plus la sphère locale, mais la sphère des fixes, nous pourrions repérer sur cette sphère une étoile par des coordonnées invariables (au moins dans une courte période) quand l'observateur se déplace sur la Terre.

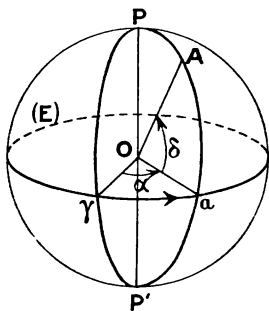


Fig. 24.

1^o Soit PAP' le cercle horaire d'une étoile et $P\gamma P'$ un cercle horaire que nous prenons pour origine (fig. 24).

● On appelle **ascension droite** (α) d'une étoile A l'angle du cercle horaire de l'étoile et du cercle horaire origine.

Cet angle s'exprime en heures, comme l'angle horaire, mais se compte positivement de 0 à 24 h dans le sens direct.

Le point γ qui fixe le cercle horaire origine sera défini plus tard (n^o 56).

Plus α est grand et plus l'étoile passe tard au méridien du lieu : cela justifie le sens adopté pour cet angle.

2^o L'angle de OA avec l'équateur est la **déclinaison** (δ) que nous avons définie dans le numéro précédent.

Pour le point γ , on a : $\alpha = 0; \quad \delta = 0.$

■ 15. Temps sidéral. — On appelle **temps sidéral** (T) l'angle horaire du point γ .

Comme tout angle horaire, c'est un angle exprimé en heures et fractions d'heures (sexagésimales). Il augmente de 24 heures en un jour sidéral. La définition correcte du jour sidéral est donc :

● Le **jour sidéral** est le temps qui s'écoule entre deux passages successifs du point γ au méridien.

Entre le temps sidéral T, l'ascension droite α et l'angle horaire H d'une étoile, il existe une relation fondamentale.

Comptons les arcs dans le sens rétrograde.

On a (fig. 25) :

$$\widehat{M\gamma} = \widehat{Ma} + \widehat{a\gamma} + 2K\pi$$

(relation de Chasles), les arcs étant exprimés en radians,

$$\text{ou : } \widehat{M\gamma} = \widehat{Ma} + \widehat{a\gamma} + K24$$

s'ils sont exprimés en heures.

$\widehat{M\gamma}$ mesure l'angle horaire de γ , compté dans le sens rétrograde; c'est le temps sidéral T, compris entre 0 et 24 h.

$\widehat{Ma}$ mesure l'angle horaire H de A, compté dans le sens rétrograde. Cet angle est compris entre 0 et 24 h.

$\widehat{a\gamma}$, compté dans le sens rétrograde, est l'arc γa compté dans le sens direct. C'est l'ascension droite α .

$$\text{On a donc : } T = H + \alpha + K.24.$$

Si $H + \alpha$ est inférieur à 24, on fait $K = 0$.

$$T = H + \alpha.$$

Si $H + \alpha$ est supérieur à 24, il est inférieur à 48; on prend :

$$T = H + \alpha - 24.$$

Par suite, si on connaît les coordonnées α et δ d'une étoile sur la sphère des fixes, on en déduira ses coordonnées horaires H et δ et par suite sa position à un instant donné T, sur la sphère locale. Ce sont les problèmes qui se posent constamment aux navigateurs.

Si $H = 0$ on a $T = \alpha$. Cela montre que la détermination de l'ascension droite se fera très simplement lors du passage au méridien.

L'ascension droite et la déclinaison se déterminent à l'aide de **l'horloge astronomique** et de la **lunette méridienne**.

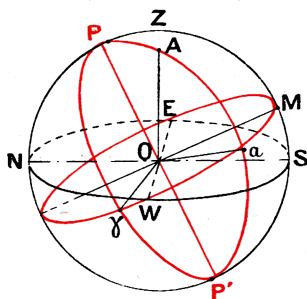


Fig. 25.

■ **16. Horloge astronomique.** — Une horloge astronomique est destinée à conserver le temps sidéral. Elle est réglée de façon à marquer 0 heure au moment du passage du point γ . Elle est graduée de 0 à 24 h. Elle indique donc le temps sidéral.

En réalité, on ne peut maintenir à l'heure une horloge avec une précision suffisante. Mais l'observation des passages d'une étoile permet de dresser des tables de correction.

Ces horloges sont installées dans des locaux souterrains où elles échappent aux trépidations, aux fluctuations de la température, et dans la mesure du possible, aux variations de la pression atmosphérique. Leur remontage est assuré automatiquement. Comme elles sont consultées à distance, elles n'ont ni cadran, ni aiguilles. Les oscillations du balancier s'enregistrent sur un *chronographe électrique*.

Les horloges à quartz, à oscillations électriques, donnent une précision excellente.

REMARQUE. — Les 24 heures de l'horloge astronomique correspondent à 23 h 56 mn de nos horloges. Il ne faudrait pas régler sa montre sur une horloge astronomique.

■ **17. Lunette méridienne.** — La *lunette méridienne* est une lunette installée de façon à ne pouvoir se déplacer que dans le plan du méridien.

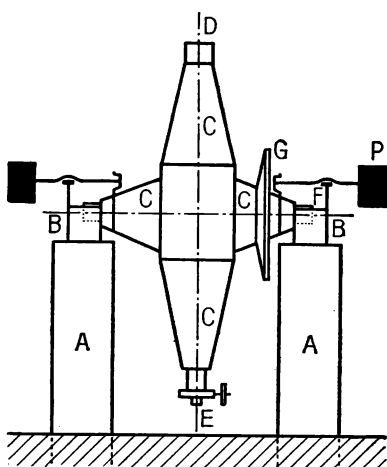


Fig. 26.
Schéma d'une lunette méridienne.

Deux gros piliers en maçonnerie A supportent la lunette par l'intermédiaire de coussinets B (fig. 26). La lunette est constituée par 4 cônes métalliques creux C, réunis en croix sur une caisse parallélépipédique. Un cône porte l'objectif D, un autre l'oculaire E, les deux autres portent les tourillons qui reposent sur les coussinets. L'appareil pesant plusieurs quintaux, on évite l'usure des tourillons

en équilibrant la lunette par des contrepoids P.

Un disque G, gradué en degrés et de 5' en 5', permet de mesurer les déplacements angulaires de la lunette.

L'appareil est construit et réglé de façon que son axe de rotation soit perpendiculaire à l'axe optique de la lunette et au

plan méridien du lieu. La lunette se déplace alors dans le plan méridien et permet de viser une étoile à son passage dans ce plan.

Il sort du cadre de cet ouvrage de décrire les réglages délicats qui permettent l'installation d'une lunette méridienne et les corrections qui doivent être apportées aux résultats d'observations. Il suffit de savoir que son emploi exige de grandes précautions, que la plate-forme sur laquelle se tient l'observateur est sans contact avec les piliers pour éviter toute trépidation et que les erreurs dues aux causes personnelles sont éliminées le plus possible par des enregistrements automatiques.

■ 18. **Détermination de l'ascension droite.** — On observe une étoile à son passage au méridien : c'est le moment où son image se forme, dans la lunette méridienne, sur la croisée des fils du réticule. Le moment précis, enregistré automatiquement sur un chronographe, permet de savoir quelle heure sidérale indique alors l'horloge astronomique.

Supposons qu'il soit 4 h 37 mn. Cela veut dire que le cercle horaire de l'étoile est passé au méridien 4 h 37 mn après le cercle horaire du point γ .

L'ascension droite est donc, d'après la relation $T = \alpha$.

$$\alpha = 4 \text{ h } 37 \text{ mn.}$$

D'où la règle :

→ L'ascension droite d'une étoile est exprimée en heures, minutes et secondes par le temps sidéral au moment du passage de l'étoile au méridien.

EXEMPLE. — On lit (annuaire pour 1951) que l'ascension droite de *Sirius* est : 6 h 42 mn 59 s. C'est l'heure sidérale de son passage au méridien.

■ 19. **Détermination de la déclinaison.** — Au moment où l'étoile est vue dans la lunette méridienne, le cercle gradué permet de lire la distance zénithale de l'étoile.

Soit PP' l'axe du monde; nous avons représenté sur le plan d'un méridien la trace de l'horizon HH' , celle de l'équateur EE' , et les traces AA' , BB' , CC' des parallèles décrits par plusieurs étoiles. Ces étoiles culminent en A, en B, en C (fig. 28). Leurs déclinaisons respectives δ , δ' , δ'' sont les mesures algébriques des arcs EA, EB, EC, le sens positif étant de E vers P, pôle boréal.

La verticale OZ est perpendiculaire à HH' .

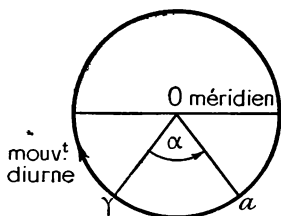


Fig. 27.

1° On a pour l'étoile A :

$$\delta = \widehat{EA} = \widehat{EZ} + \widehat{ZA}.$$

$\widehat{EZ}$ est égal à $\widehat{H'P}$, ces deux arcs étant superposables par une rotation de 90° autour de O. Or, $\widehat{H'P}$ est la hauteur φ du pôle boréal. On sait la déterminer en un point donné.

$\widehat{ZA}$ est la distance zénithale z de l'étoile à sa culmination supérieure.

On a donc :

$$\delta = \varphi + z.$$

2° Pour l'étoile B, on peut écrire :

$$\begin{aligned} \delta' &= \widehat{EB} = \widehat{EZ} - \widehat{ZB} \\ &= \varphi - z. \end{aligned}$$

3° Pour l'étoile C, on aurait également :

$$\begin{aligned} \delta'' &= \widehat{EC} = \widehat{EZ} - \widehat{ZC} \\ &= \varphi - z. \end{aligned}$$

Fig. 28.

Dans ce cas, la déclinaison est négative. Nous concluons :

Théorèmes. — 1° Si une étoile culmine entre le zénith et le pôle boréal, sa déclinaison est la somme de la hauteur du pôle boréal et de la distance zénithale de l'étoile.

2° Si l'étoile, à sa culmination supérieure, est au Sud par rapport au zénith, sa déclinaison est égale à la hauteur du pôle boréal, diminuée de la distance zénithale de l'étoile.

EXEMPLE. — A Paris, $\varphi = 48^\circ 50' 11''$ (Observatoire). *Sirius* culmine vers le Sud ; sa distance zénithale est mesurée égale à $65^\circ 29' 2''$.

La déclinaison de *Sirius* est :

$$\delta = 48^\circ 50' 11'' - 65^\circ 29' 2'' = -16^\circ 38' 51''$$

ce qui détermine le parallèle SS' de *Sirius* (fig. 29).

La même détermination faite à Tananarive, aurait donné :
Hauteur du pôle boréal : — $18^\circ 55' 2''$ (fig. 30).

Hauteur du pôle austral au-dessus de l'horizon : $18^\circ 55' 2''$.

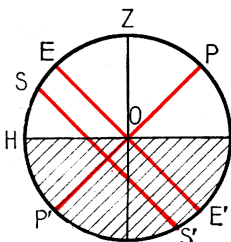


Fig. 29

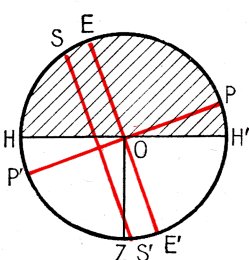


Fig. 30.

Distance zénithale observée : $2^{\circ}16'11''$, à l'opposé du pôle austral par rapport au zénith, donc vers le pôle boréal. On a donc :

$$\delta = -18^{\circ}55'2'' + 2^{\circ}16'11'' = -16^{\circ}38'51''.$$

● REMARQUES. — 1^o On mesure la distance zénithale avec la lunette méridienne plutôt que la hauteur, car il est plus facile de viser le zénith que l'horizon. Le zénith se vise en plaçant verticalement l'axe de la lunette; pour cela, on amène le réticule en coïncidence avec son image réfléchiée par le miroir horizontal formé par un bain de mercure.

Au contraire, les marins mesurent les hauteurs des astres avec le *sextant*, parce qu'ils peuvent viser facilement l'horizon limité par le ciel et la mer.

2^o Les mesures de hauteur (et de distances zénithales) doivent subir une correction due à la déviation du rayon lumineux issu de l'étoile en traversant notre atmosphère. **La réfraction relève les astres**, en incurvant vers le sol le rayon lumineux (fig. 31). Il faut donc *diminuer* la hauteur observée h_0 pour trouver la vraie hauteur h (ou augmenter la distance zénithale observée).

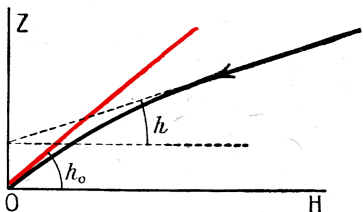


Fig. 31.

Cette correction, nulle au zénith ($h_0 = 90^{\circ}$) atteint $10'13''$ pour $h_0 = 5^{\circ}$ et $36'36''$ à l'horizon.

Des tables permettent de faire cette correction, pour laquelle on doit tenir compte de la latitude et de l'altitude du lieu d'observation, de la température et de la pression barométrique.

■ 20. **Catalogues d'étoiles.** — La détermination de l'ascension droite et de la déclinaison permettent de dresser des tables dans lesquelles les principales étoiles sont caractérisées par leurs coordonnées équatoriales. Ces tables, publiées chaque année par l'*Annuaire du Bureau des longitudes* et par la *Connaissance des Temps*, sont d'un usage constant en Astronomie et en navigation maritime et aérienne. Nous en donnons un extrait à la page 220.

■ 21. **Applications.** — 1^o **Étoiles visibles en un lieu donné.**

La visibilité d'une étoile en un lieu donné dépend de la déclinaison de cette étoile et de la hauteur du pôle visible au-dessus de l'horizon du lieu. Le tableau suivant résume les divers cas, selon que l'un ou l'autre des pôles est au-dessus de l'horizon.

Le pôle <i>boréal</i> est visible (fig. 32). $\delta \geq 90^\circ - \varphi$: étoiles <i>circumpolaires boréales</i> ; $\varphi - 90^\circ < \delta < 90^\circ - \varphi$: étoiles à lever et coucher ; $\delta \leq \varphi - 90^\circ$: étoiles invisibles.	Le pôle <i>austral</i> est visible (fig. 33). $\delta \geq 90^\circ - \varphi$: étoiles invisibles ; $\varphi - 90^\circ < \delta < 90^\circ - \varphi$: étoiles à lever et coucher ; $\delta \leq \varphi - 90^\circ$: étoiles <i>circumpolaires australes</i>.
--	--

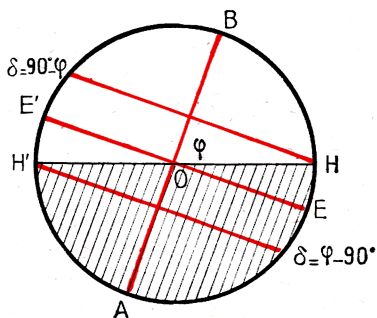


Fig. 32.

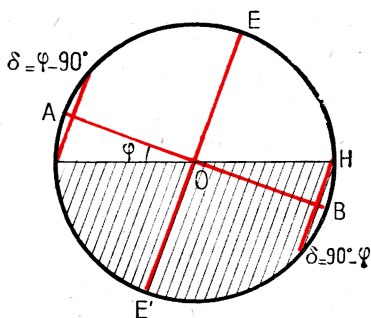


Fig. 33.

2° Durée de la visibilité d'une étoile à lever et coucher.

● PROBLÈME. — Calculer la durée de visibilité d'une étoile de déclinaison δ si la hauteur du pôle est φ .

Cette étoile décrit le parallèle AA' et reste au-dessus de l'horizon tant

qu'elle décrit l'arc qui se projette en AB sur le plan du méridien pris pour plan de figure.

Rabattons le cercle de diamètre AA'. L'arc AB' est la moitié de l'arc de visibilité; l'arc B'A' est la moitié de l'arc d'invisibilité.

Exprimons ce dernier arc. Soit x sa mesure en degrés.

On a, dans le triangle BωB' :

$$\cos x = \frac{\omega B}{\omega B'}$$

Dans le triangle OωB :

$$\omega B = \omega O \operatorname{tg} \varphi$$

et dans le triangle AωO :

$$\omega B' = \omega A = \omega O \cotg \delta$$

d'où :

$$\cos x = \frac{\operatorname{tg} \varphi}{\cotg \delta} = \operatorname{tg} \varphi \operatorname{tg} \delta.$$

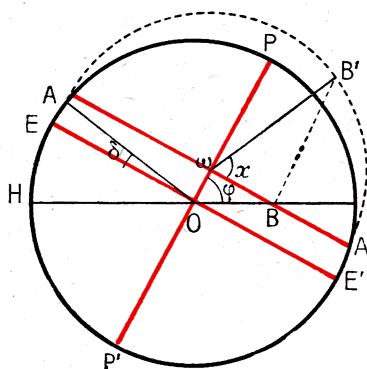


Fig. 34.

RÉSUMÉ DES COORDONNÉES

SPHÈRE	Repères	Coordonnées
locale	verticale; horizon; Sud.	hauteur : h azimut : a
locale	axe polaire $h = \varphi$; équateur; Sud.	angle horaire : H déclinaison : δ
des fixes	axe polaire; équateur; γ .	ascension droite : α déclinaison : δ

EXERCICES

6. — Transformer en degrés et minutes les angles horaires suivants :
1 h 15 mn 30 s.; 13 h 43 mn 20 s.; 19 h 25 mn 25 s

7. — Transformer en angles horaires les angles suivants :
18°30'; 142°30'; 272°45'.

8. — La distance zénithale est un angle positif par définition. Cela entraîne l'emploi de deux formules :

$$\delta = \varphi + z \quad \text{et} \quad \delta = \varphi - z,$$

suivant la position de l'étoile à sa culmination, par rapport au zénith et au pôle. Quelle convention aurait-on pu faire sur le signe de la distance zénithale pour remplacer les deux formules par une seule? Si l'on fait l'une des conventions possibles, la distance zénithale sera-t-elle encore le complément algébrique de la hauteur?

9. — Avec quelle précision doit-on apprécier la fraction de seconde donnée par une horloge astronomique pour que l'ascension droite d'une étoile puisse être donnée avec une précision de 1 seconde d'arc?

10. — Une étoile a pour ascension droite : $\alpha = 16$ h 40 mn.

On l'observe quand l'horloge sidérale indique 5 h 30 mn. Quel est alors l'angle horaire de cette étoile? Quel sera l'angle horaire de la même étoile 12 heures plus tard?

11. — En utilisant la relation :

$$\cos x = \operatorname{tg} \varphi \operatorname{tg} \delta$$

exprimer la relation qui doit exister entre φ et δ pour que $\cos x$ soit compris entre -1 et $+1$. Retrouver ainsi la déclinaison des étoiles circumpolaires quand la hauteur du pôle est φ .

4

DESCRIPTION SOMMAIRE DU CIEL

■ **22. Carte du Ciel.** — La détermination des coordonnées équatoriales des étoiles permet de dresser, par les procédés employés en Géographie et que nous verrons au chapitre suivant, des cartes du Ciel.

On place d'abord les principales étoiles par leurs coordonnées, puis on complète la carte par des photographies des régions célestes qui entourent ces étoiles dites *fondamentales*.

Nous donnons (p. 104 et 105) une carte du Ciel pour chacun des hémisphères de la sphère céleste.

Mais il convient de savoir reconnaître les principales constellations visibles à l'œil nu. Cette reconnaissance est facile par la *méthode des alignements*; nous ne la ferons que pour la partie du ciel visible en France. L'emploi de la carte du Ciel permettra de la prolonger au cours de déplacements plus lointains.

Dans une même constellation, on désigne les étoiles par les lettres grecques α , β , etc. Les plus brillantes étoiles du Ciel sont dites de *première grandeur*, toutes les étoiles visibles à l'œil nu ayant été rangées en six *grandeurs*.

■ **23. Autour du pôle boréal.** — La première constellation à reconnaître est la *Grande Ourse*, ou Chariot, dessinée figure 35 qui est circumpolaire pour toute la France, donc visible à tout moment d'une nuit sans nuages. Les étoiles α et β s'appellent les *gardes*.

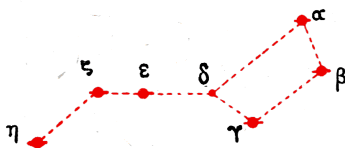


Fig. 35. — La Grande Ourse.

La ligne des gardes, prolongée de β vers α de 5 fois sa longueur conduit à l'*étoile polaire* qui n'est qu'à 1° environ du pôle. Elle permet donc de s'orienter la nuit, en donnant la direction du Nord.

La Polaire est l'étoile α d'une constellation appelée : la *Petite Ourse* ressemblant à la Grande Ourse, mais ayant l'air de s'en déduire par une homothétie négative.

Entre les deux Ourses se développent les sinuosités du *Dragon*, dont la tête est ornée de deux belles étoiles.

A l'opposé de la Grande Ourse, par rapport à la Polaire, et sensiblement à la même distance angulaire, on trouve un W très ouvert qui est **Cassiopeée**.

Si l'on prolonge la ligne $\delta\alpha$ de la grande Ourse d'environ 5 fois

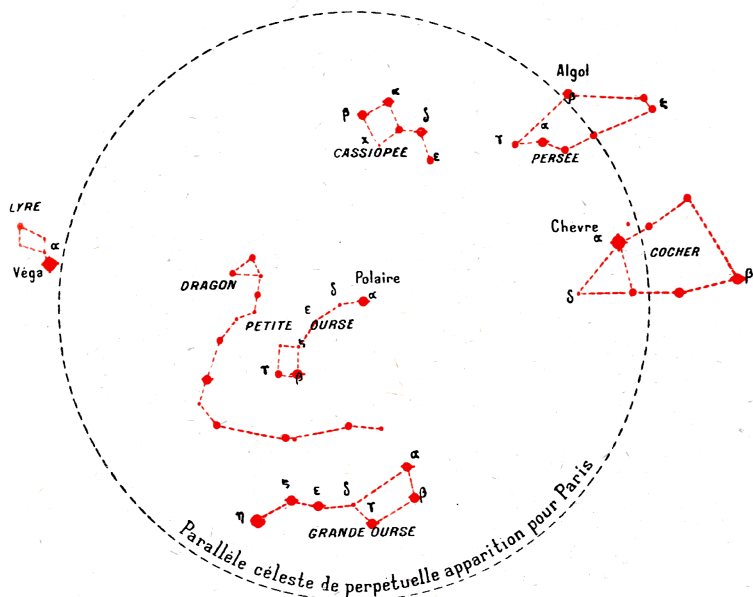


Fig. 36. — Constellations circumpolaires boréales.

sa longueur on trouve une belle étoile, qui est *La Chèvre* (α de la constellation du **Cocher**).

Entre Cassiopee et le Cocher se trouve **Persée**, dont la principale étoile α est très belle. L'étoile β de cette constellation, nommée **Algol**, a un éclat qui varie sensiblement au cours d'une nuit.

Nous avons cité ici les principales constellations qui sont, en totalité ou en partie, circumpolaires à Paris et en France. Le cercle tracé (fig. 36) en pointillé, est le parallèle céleste de *perpétuelle apparition* pour Paris.

■ **24. Constellations à lever et coucher.** — La ligne qui va des gardes de la Grande Ourse à la Polaire, prolongée de deux fois sa longueur, tombe, au-delà de Cassiopee, dans un grand trapèze dit **Carré de Pégase**, prolongé par **Andromède**, entre Pégase et Persée. L'ensemble des 7 plus belles étoiles de Pégase,

Andromède et α de Persée forme une figure analogue à la Grande Ourse, mais beaucoup plus grande¹.

La queue de la Grande Ourse, prolongée d'une longueur à peu près égale à celle de la Grande Ourse, rencontre **Arcturus**,

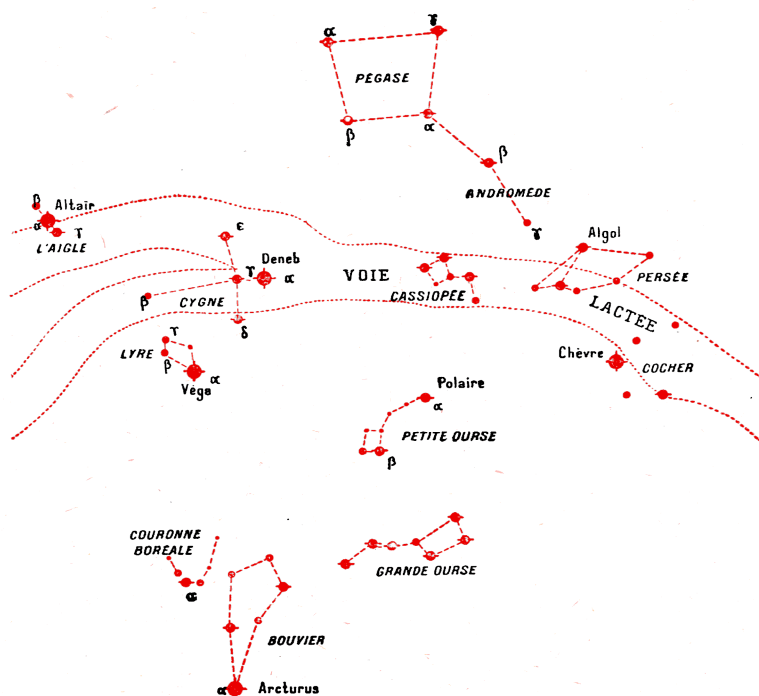


Fig. 37. — Constellations dans le ciel, côté Nord.

belle étoile de la constellation du **Bouvier**, au voisinage duquel six étoiles en demi-cercle et très rapprochées forment la **Couronne boréale**.

A peu près symétrique du Cocher, par rapport à la Polaire se trouve la **Lyre**, dont les 7 étoiles forment un triangle et un parallélogramme opposés par un sommet. L'étoile **Véga** de la Lyre, très blanche, est une des belles étoiles du Ciel. Elle est sensiblement au zénith, à Paris, en août vers 21 heures.

Arcturus, *Véga* et la *Polaire* forment un angle droit de sommet *Véga*.

Un peu au-delà de la Lyre en venant de la Couronne boréale, et dans la vaste traînée blanche qui est la **Voie lactée**, on trouve le **Cygne** avec la belle étoile **Deneb**. Les cinq étoiles du Cygne

1. L'un des sommets du carré de Pégase appartient à Andromède.

forment une croix, un peu tordue. Le bras $\gamma\beta$ est plus long que les trois autres. La Lyre est dans l'un des angles droits formés par ce bras.

Dans l'autre, on trouve l'**Aigle**, dont les trois étoiles principales sont alignées. La droite qu'elles forment passe par Véga. L'étoile centrale **Altair** est de première grandeur.

La Lyre, le Cygne et l'Aigle sont visibles simultanément à Paris en août et septembre, au début de la nuit.

Symétrique de la Polaire, par rapport à la Chèvre, on voit, en fin de nuit en été, au début de la nuit en hiver, la magnifique constellation d'**Orion**, dont les étoiles principales forment un grand trapèze. Les étoiles α et β (**Bételgeuse** et **Rigel**) sont de première grandeur. A l'intérieur, trois étoiles alignées forment le **Baudrier d'Orion**. En prolongeant le baudrier vers le Sud, on trouve **Sirius**, la plus belle étoile du Ciel, de la constellation du **Chien**; en le prolongeant vers le Nord, on passe au voisinage d'**Aldebaran** (α du **Taureau**). L'étoile la plus au Nord du Baudrier d'Orion est sensiblement sur l'équateur céleste; **Aldebaran** et **Sirius** ont des déclinaisons respectives de $+16^\circ$ et -16° environ.

Nous laissons au lecteur le soin, en s'aidant de la carte du Ciel, au cours d'un voyage vers les régions situées plus au Sud que la France, de découvrir les étoiles du Ciel austral, et la joie d'apercevoir la **Croix du Sud**, la plus remarquable des constellations circumpolaires australes.

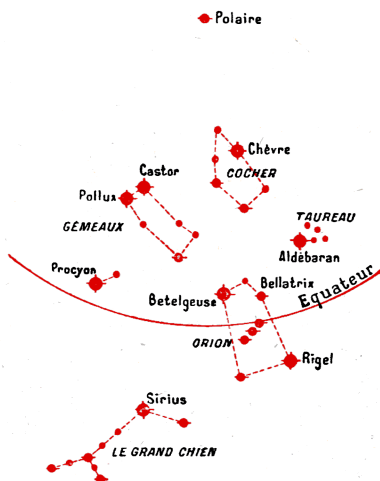


Fig. 38.
Constellations dans le ciel, côté Sud.

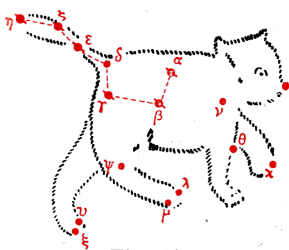


Fig. 39.

● REMARQUE. — L'origine des noms des constellations est fort variable. L'Antiquité avait peuplé le Ciel de figures fabuleuses qui dénotaient de beaucoup d'imagination de la part de leur auteur. Ainsi, *Persée*, monté sur son cheval ailé, *Pégase*, délivra *Andromède* enchaînée sur un rocher, puis l'épousa. Les Grecs les retrouvaient unis dans le Ciel, dans les constellations auxquelles ils ont donné leurs noms.

A titre de curiosité, nous reproduisons (fig. 39) l'image de la *Grande Ourse*, telle qu'on pouvait la voir sur une carte du Ciel dressée au xv^e siècle.

Les constellations du ciel austral, dont la découverte a suivi les progrès de la navigation, et qui étaient inconnues des Anciens, portent des noms qui n'ont plus rien à voir avec la mythologie (le *Télescope*, la *Grue*, l'*Equerre*, l'*Octant*, etc.).

◀ LECTURES ▶

■ 25. Le **gyroscope**. — Inventé par FOUCAULT, le gyroscope est essentiellement un disque métallique, renforcé sur ses bords par un tore massif qui augmente son moment d'inertie. Ce disque est sus-

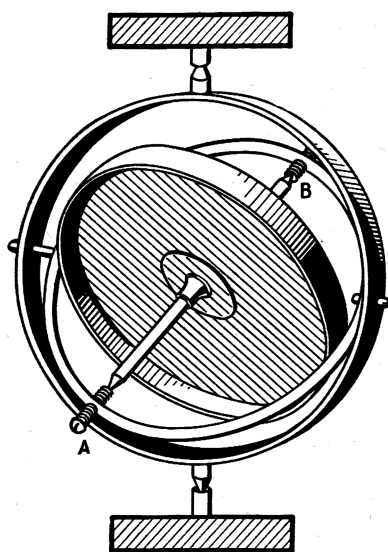


Fig. 40.

pendu à la *Cardan*, ce qui permet à son axe de prendre une orientation quelconque.

Lancé en rotation rapide autour de son axe, le plan du gyroscope (comme le plan d'oscillation d'un pendule) reste fixe par rapport aux étoiles.

Par suite de la rotation de la Terre, l'axe AB, s'il est dirigé dans une direction fixe quelconque par rapport aux étoiles, semble décrire un cône de révolution autour de l'axe du monde.

Si l'axe du gyroscope est placé dans un plan horizontal et contraint à rester dans ce plan, il s'y oriente suivant la direction Nord-Sud. Le gyroscope, dont la rotation est entretenue électriquement,

devient alors une boussole, particulièrement précieuse parce qu'elle indique le Nord vrai et non pas le Nord magnétique et qu'elle échappe à l'action des masses métalliques. C'est le principe du compas gyroscopique employé à bord des sous-marins et à l'intérieur des postes de commandement blindés des cuirassés.

Si l'axe du gyroscope a été placé dans le plan du méridien, et contraint à rester dans ce plan, il s'y oriente suivant l'axe du monde. Il fournit ainsi la hauteur du pôle au-dessus de l'horizon, sans qu'on ait besoin d'observer un astre. On voit l'intérêt que cela présenterait pour la navigation sous-marine. Mais la précision nécessaire serait la minute : on ne l'atteint pas actuellement.

Nous ne donnons ici que le principe de ces deux applications. L'entretien du mouvement, l'amortissement des oscillations autour

des directions indiquées, sont des questions que nous ne pouvons traiter ici.

Le gyroscope est enfin l'organe essentiel du pilotage automatique des avions.

■ **26. Le sextant.** — Le sextant permet la mesure de la hauteur d'un astre, lorsque l'opérateur ne dispose pas d'un support stable, ce qui est indispensable pour le théodolite.

Le sextant est constitué par un secteur AOB de 60° . Une lunette, fixée sur OB, est parallèle à la corde AB. Un miroir M est fixé sur OA, parallèlement à OB; c'est une petite lame de verre dont la moitié ME est transparente et la moitié MD argentée pour faire miroir.

Un autre miroir O est placé au centre du secteur, et porté par une alidade mobile OC.

L'appareil étant tenu à la main, l'observateur dirige la lunette sur l'horizon, qu'il aperçoit à travers la partie transparente de M;

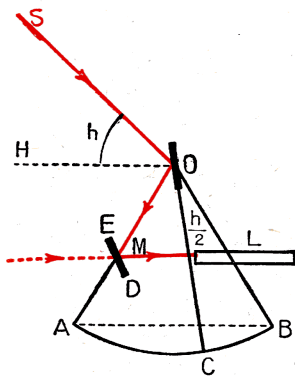


Fig. 41.

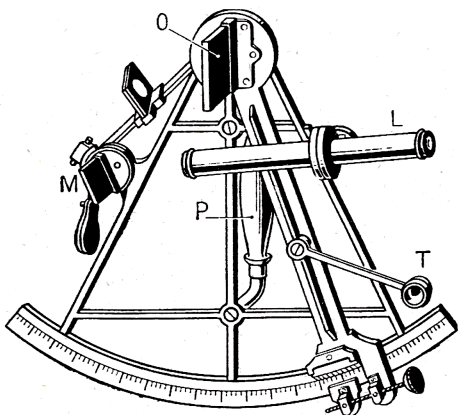


Fig. 42.

il manœuvre en même temps l'alidade de façon à apercevoir, par double réflexion sur O et sur la partie réfléchissante de M, l'astre dont il veut mesurer la hauteur (étoile, lune, soleil ou planète).

Supposons que la coïncidence des deux images soit réalisée, c'est-à-dire que l'on voit à la fois, dans la lunette, l'horizon et l'astre observé. La marche du rayon lumineux venant de l'astre est alors indiquée par SO, OM, ML. En menant OH parallèle à ML, l'angle SOH est double de l'angle COB, suivant une propriété connue d'un miroir qui tourne. Il suffit de lire sur un cercle gradué porté par AB l'arc BC pour en déduire l'angle SOH qui est l'angle h cherché.

Le sextant est indispensable aux navigateurs. Nous l'avons représenté (fig. 42). On le tient par la poignée P et on manœuvre l'alidade

par la tige T. Un vernier permet de lire la graduation et de déterminer les hauteurs à une minute près.

On évite la multiplication par 2 en divisant l'arc AB en 120 parties égales que l'on numérote comme si c'étaient des degrés.

Dans l'observation du soleil, on interpose en avant de O des verres ombrés.

Quand l'horizon n'est pas nettement visible, soit pour une mesure de hauteur faite la nuit, soit pour une mesure de hauteur du Soleil quand l'horizon est embrumé, un dispositif ingénieux permet de viser un horizon artificiel représenté par une petite lampe électrique solidaire d'un gyroscope fixé au sextant.

EXERCICES SUR LE CHAPITRE PREMIER

12. — Deux étoiles passent successivement au méridien d'un lieu à 8 h 36 mn 45 s et à 23 h 30 mn 27 s (temps sidéral). Calculer la différence de leurs ascensions droites.

13. — A Paris ($\varphi = 48^{\circ}50'$) on observe l'étoile α Grande Ourse ($\delta = 62^{\circ}$). Calculer les distances zénithales de cette étoile lors de ses passages au méridien.

14. — La déclinaison d'une étoile est δ . En quels lieux de la Terre est-elle circumpolaire? En quels lieux est-elle visible? En quels lieux a-t-elle un lever et un coucher? On caractérisera chacun des lieux terrestres demandés par la hauteur du pôle boréal ou du pôle austral.

Appliquer à *Aldebaran* pour laquelle $\delta = 16^{\circ}24'45''$ et à l'étoile α du *Centaure* pour laquelle $\delta = -60^{\circ}38'4''$.

15. — En un lieu où la hauteur du pôle boréal est φ ($\varphi > 0$) on observe une étoile de déclinaison δ . Calculer la fraction du jour sidéral pendant laquelle cette étoile est au-dessus de l'horizon.

Appliquer à l'étoile *Arcturus* pour laquelle $\delta = 19^{\circ}26'12''$ si $\varphi = 48^{\circ}50'11''$.

16. — Avec les notations de l'exercice 15, calculer les azimuts de l'étoile à son lever et à son coucher.

Même application numérique.

17. — Montrer que si une étoile est circumpolaire, son azimut possède un maximum et un minimum.

Appliquer à l'étoile α de la Grande Ourse pour laquelle $\delta = 62^{\circ}0'57''$ en prenant $\varphi = 45^{\circ}$.

18. — La hauteur du pôle étant $47^{\circ}25'$ on mesure la distance zénithale d'une étoile et on trouve $16^{\circ}15'30''$. Calculer la déclinaison de cette étoile :

1° si le pôle visible est boréal, la culmination se faisant à l'opposé du zénith par rapport au pôle;

2° si le pôle visible est austral, la culmination se faisant entre le zénith et le pôle visible;

3° si le pôle visible est austral, la culmination se faisant à l'opposé du pôle visible par rapport au zénith.

19. — Calculer la déclinaison du cercle de perpétuelle apparition pour un point où la hauteur du pôle boréal est $37^{\circ}50'$; pour un point où la hauteur du pôle austral au-dessus de l'horizon visible est $37^{\circ}50'$.

CHAPITRE II

LA TERRE

- 1. *Forme approchée de la Terre.*
- 2. *Coordonnées géographiques.*
- 3. *Forme et dimensions de la Terre.*
- 4. *Cartes géographiques.*

1

FORME APPROCHÉE DE LA TERRE

■ 27. **La Terre est isolée dans l'espace.** — Cette notion, qui nous est familière depuis qu'on a parcouru la Terre en tous sens, avait échappé aux Anciens.

■ 28. **Sphéricité approchée de la Terre.** — 1^o La forme de la Terre nous est masquée par les inégalités de son relief. Mais si on observe d'un endroit élevé, au bord de la mer, ou mieux encore d'un sommet isolé au milieu d'une île, on a l'impression de se trouver au centre d'un cercle dessiné par la ligne de séparation du ciel et de l'eau.

Montons un théodolite de manière que son axe soit vertical et visons, dans un azimut quelconque, cette ligne de séparation. En faisant alors tourner l'appareil autour de son axe vertical sans toucher à la lunette, nous constaterons que dans tous les azimuts, la lunette reste pointée sur la ligne de séparation.

Cette ligne est l'***horizon sensible*** pour le point d'observation choisi. D'après notre observation, elle paraît tracée sur un cône de révolution ayant pour axe la verticale de la station.

Cette expérience renouvelée en divers lieux à des altitudes diverses nous amène à conclure :

→ La surface de séparation des mers et de l'air qui nous entoure est à peu près sphérique.

2^o L'ombre de la Terre, observée au moment des éclipses, confirme que la Terre, comme le Soleil, la Lune et les planètes observables directement, a une forme sensiblement sphérique.

3° Des photographies récentes, prises automatiquement par un appareil entraîné par une fusée à 160 km de hauteur, permettent de voir réellement la courbure de la Terre (fig. 44).

■ 29. **Rayon de la sphère.** — Recherchons si l'expérience décrite au 1° du n° 28 peut nous donner le rayon de la Terre.

Le cône circonscrit à une sphère ayant pour sommet un point O est de révolution autour du rayon qui aboutit en O. Il résulte de l'expérience précédente que la verticale d'un lieu est le rayon terrestre qui passe par le point considéré. Coupons alors la figure par un plan contenant le point O et le centre de la surface des mers. Nous obtenons (fig. 43) un grand cercle de centre C. Le cône de révolution circonscrit de sommet O est coupé suivant les deux tangentes OA et OB. L'axe du cône est OC, ver-

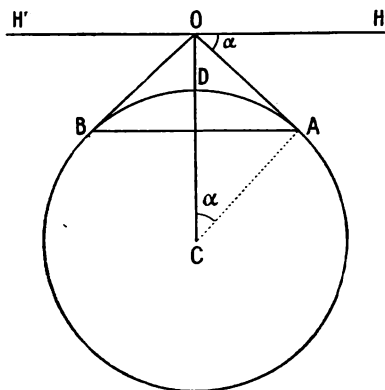


Fig. 43.

ticale du point O. Le plan perpendiculaire en O à OC est ce que nous avons appelé l'horizon du point O. Il est coupé par le plan de figure suivant la droite HOH'. L'angle HOA, que nous appellerons α , peut être mesuré à l'aide du théodolite.

Cet angle α porte le nom de **dépression de l'horizon sensible** en O.

Appelons R le rayon de la sphère, h la distance OD qui peut être mesurée; le triangle rectangle OAC dans lequel l'angle OCA est égal à α (côtés perpendiculaires) donne la relation:

$$CA = OC \cos \alpha$$

ou :

$$R = (R + h) \cos \alpha.$$

On en déduit :

$$R = \frac{h \cos \alpha}{1 - \cos \alpha} = \frac{h \cos \alpha}{2 \sin^2 \frac{\alpha}{2}}.$$

On peut écrire :

$$\cos \alpha = \frac{\sin \alpha}{\operatorname{tg} \alpha} = \frac{2 \sin \frac{\alpha}{2} \cos \frac{\alpha}{2}}{\operatorname{tg} \alpha}$$

d'où :

$$R = \frac{h}{\operatorname{tg} \alpha \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}}.$$

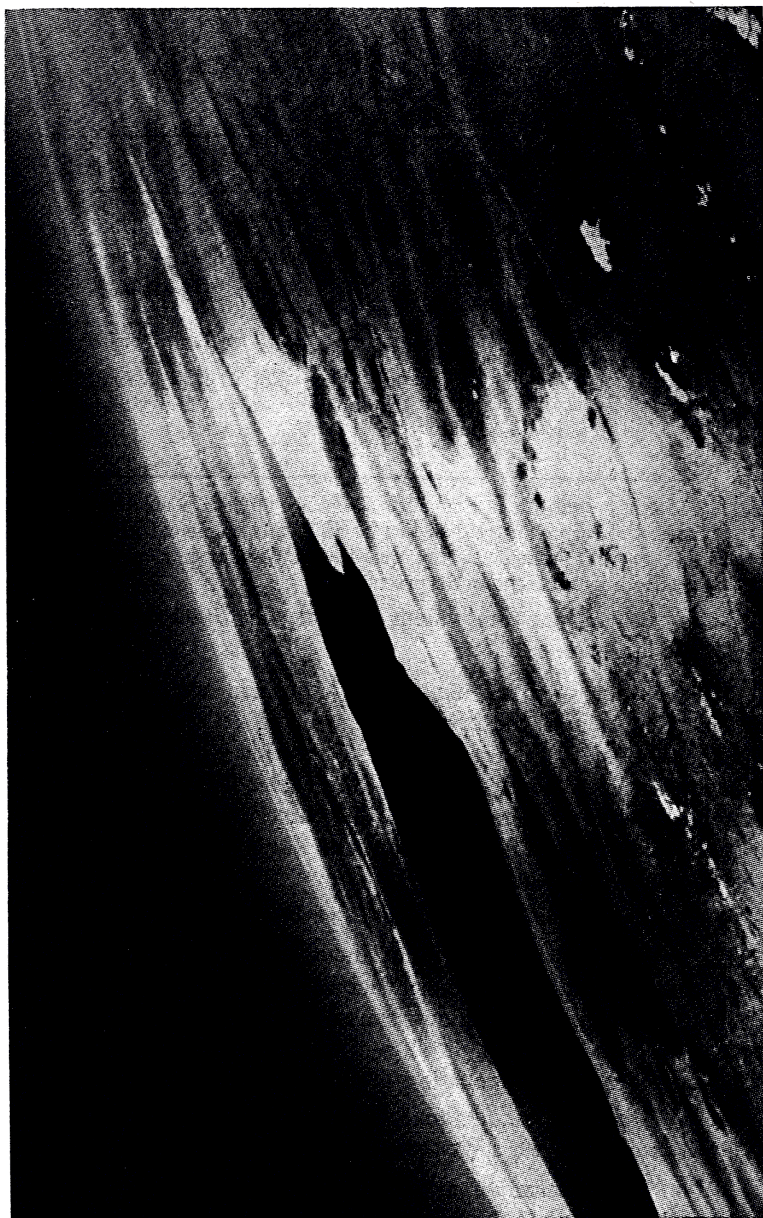


Photo Service d'Information U. S. A.

Fig. 44. — La Terre vue d'une fusée.

On aperçoit la courbure de la Terre. Le golfe noir est le Golfe de Californie, large d'une centaine de kilomètres.

EXEMPLE. — L'expérience, faite à Brest par les élèves de l'École Navale, a donné : $h = 75$ m; $\alpha = 15'30''$.

On a alors : $\alpha = 930''$; $\frac{\alpha}{2} = 465''$; $h = 0,075$ km.

Faisons le calcul par logarithmes.

<i>Calculs auxiliaires.</i>	<i>Calculs définitifs.</i>
$\log 930 = 2,96848$	$\log 0,075 = \bar{2},87506$
$T = \underline{6,68558}$	$\text{colog } \text{tg } \alpha = 2,34594$
$\log \text{tg } \alpha = \bar{3},65406$	$\text{colog } \text{tg } \frac{\alpha}{2} = 2,64697$
$\log 465 = 2,66745$	$\log R = \underline{3,86797}$
$T = \underline{6,68558}$	d'où : $R = 7379$ km.
$\log \text{tg } \frac{\alpha}{2} = \bar{3},35303$	

Remarquons que le théodolite a donné l'angle α à un demi-minute près. Or, en prenant $16'$ au lieu de $15'30''$, le même calcul conduirait à $R = 6924$ km. C'est dire que le calcul de R par cette méthode n'offre aucun caractère de précision.

Nous retiendrons une valeur voisine de 7 000 km pour le rayon de la Terre.

■ 30. **Géoïde.** — Dans une plaine, l'horizon sensible présente en gros les mêmes caractères que sur la mer. Il n'en est plus ainsi en pays de montagnes. Mais les plus hautes montagnes n'atteignent pas 9 km au-dessus du niveau de la mer. Sur une sphère de 1 mètre de rayon, la saillie correspondante dépasserait à peine un millimètre. Nous pouvons donc dire, dans une première approximation :

→ La Terre est une sphère dont le rayon est voisin de 7 000 km.

En tout cas, en chaque point de la mer, le plan tangent est horizontal. Si l'on suppose la surface des mers prolongée à travers les continents (par des canaux sans écluses, mais qui pourraient passer dans des tunnels), on obtiendra une surface sans aspérités dues au relief. On l'appelle le **géοïde**.

● Le **géοïde** est la forme que prendrait la Terre si les mers étaient prolongées sur toute sa surface.

Si l'on sait déterminer le géοïde, la connaissance de la Terre s'en déduira en y adjoignant le relief.

Le géοïde est presque sphérique; il faut néanmoins définir les coordonnées d'un point à sa surface de façon que les définitions s'appliquent à une figure convexe de forme quelconque.

2

COORDONNÉES
GÉOGRAPHIQUES

■ 31. Points et lignes remarquables de la Terre. — Nous avons énoncé deux hypothèses résultant des observations :

1° *La Terre tourne sur elle-même autour d'un axe fixe en 24 heures sidérales.*

2° *Elle est sensiblement sphérique.*

En un point A de la Terre, nous savons déterminer :

1° la direction de la verticale (fil à plomb);

2° le plan de l'horizon qui lui est perpendiculaire;

3° la direction de l'axe du monde qui passe par le pôle visible du Ciel.

Si la Terre est sphérique, nous pouvons dire :

La verticale ascendante AV du point A est le prolongement du rayon OA (fig. 45).

Le plan de l'horizon en A est le plan tangent à la sphère en A.

L'axe de rotation de la Terre la perce en deux points P et P'. Le point P situé par rapport à la Terre, du même côté que le pôle céleste boréal est le **pôle Nord de la terre**. Le point P' est le pôle **Sud**.

Dans sa rotation autour de l'axe PP', le point A décrit un cercle perpendiculaire à PP'. Ce cercle est un **parallèle (C)**.

Le plus grand des parallèles passe par O : c'est l'**équateur (E)** de la Terre.

Son plan est confondu avec l'équateur de la sphère céleste.

Le demi grand cercle de diamètre PP' et passant par A est le **méridien** du point A. Ce méridien en tournant autour de PP' d'Ouest en Est balaie la Terre en 24 heures sidérales. Le plan de ce méridien est confondu avec le méridien de la sphère céleste passant par le zénith du point A.

Si de A on vise le pôle céleste visible, on obtient une direction Ap parallèle à PP'.

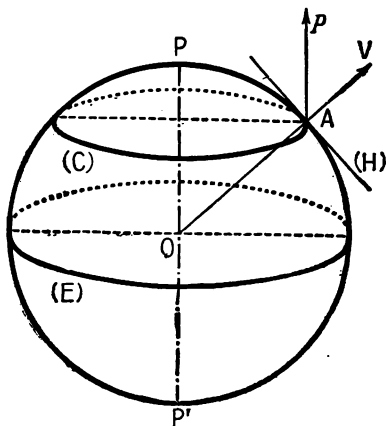


Fig. 45.

■ **32. Coordonnées géographiques.** — Nous pourrions déterminer la position d'un point sur la surface de la Terre par deux coordonnées : la *longitude* et la *latitude*.

● La *longitude* (L) d'un lieu est l'angle dièdre formé par un méridien choisi comme origine et par le méridien du lieu.

Cet angle peut être compté en degrés de -180 à $+180^\circ$; il est compté positivement *dans le sens rétrograde* autour de l'axe du monde.

On l'exprime également en *heures*. Il est alors compté entre -12 h et $+12$ h.

Par suite d'un accord international, le méridien origine, ou *premier méridien universel* est celui de *Greenwich* (observatoire anglais près de Londres).

● La *latitude* (φ) d'un lieu est l'angle formé par la verticale du lieu et le plan de l'équateur.

Elle se compte à partir de l'équateur, positivement dans la direction du pôle nord; elle est donc comprise entre -90° et $+90^\circ$.

Nous remarquerons que ces définitions subsistent si la Terre est un solide de révolution autour de l'axe des pôles sans être absolument sphérique.

Tous les points d'un même méridien ont même longitude.

Tous les points d'un même parallèle ont même latitude.

La latitude de l'équateur est 0 ; celle du pôle nord est $+90^\circ$; celle du pôle sud est -90° ; la longitude des pôles est indéterminée.

■ **33. Détermination de la longitude.** — Soit G le point

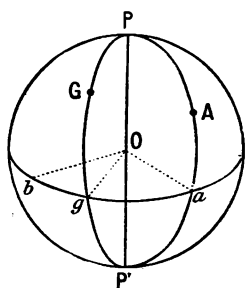


Fig. 46.

qui détermine le méridien de Greenwich, g l'intersection de ce méridien avec l'équateur. Le méridien du point A dont nous voulons la longitude, coupe l'équateur en a (fig. 46).

Un astre quelconque B , non représenté sur la figure, détermine avec PP' , axe du monde, un plan qui coupe l'équateur en b . Le point b décrit l'équateur dans le sens rétrograde en 24 heures sidérales.

A un instant donné, si on mesure les angles en radians, on a :

$$(\vec{Og}, \vec{Oa}) = (\vec{Ob}, \vec{Oa}) - (\vec{Ob}, \vec{Og}) + 2k\pi \quad (k \text{ entier ou nul})$$

Si on les exprime en heures on aura :

$$(\vec{Og}, \vec{Oa}) = (\vec{Ob}, \vec{Oa}) - (\vec{Ob}, \vec{Og}) + k.24.$$

Comptons ces angles dans le sens rétrograde :

$(\vec{Og}, \vec{Oa}) = L$, longitude de A, compris entre -12 h et $+12$ h.

$(\vec{Ob}, \vec{Oa}) = -(\vec{Oa}, \vec{Ob}) = -H_A$ angle horaire de B par rapport au méridien du point A; cet angle est compris entre 0 et 24 h.

$(\vec{Ob}, \vec{Og}) = -(\vec{Og}, \vec{Ob}) = -H_G$, angle horaire de B par rapport au méridien de G.

Cet angle est compris entre 0 et 24 h.

On a donc :

$$L = H_G - H_A + k.24.$$

$H_G - H_A$ est compris entre -24 et $+24$.

Si cette différence est comprise entre -12 et $+12$ elle donne L et l'on a :

$$L = H_G - H_A. \quad (1)$$

Si elle est comprise entre -24 et -12 on l'augmente de 24 et l'on a :

$$L = H_G - H_A + 24. \quad (2)$$

Si elle est comprise entre $+12$ et $+24$, on prend $k = -1$ et l'on a :

$$L = H_G - H_A - 24. \quad (3)$$

Mais nous avons vu (n° 15) que l'heure sidérale T, en un lieu, est liée à l'ascension droite et à l'angle horaire H d'un astre par la relation :

$$T = \alpha + H \quad \text{ou} \quad T = \alpha + H - 24,$$

$$\text{d'où :} \quad H = T - \alpha \quad \text{ou} \quad H = T - \alpha + 24.$$

On aura donc :

$$L = T_G - T_A \quad (1)$$

$$\text{ou :} \quad L = T_G - T_A + 24 \quad (2)$$

$$\text{ou :} \quad L = T_G - T_A - 24. \quad (3)$$

D'où la règle :

La longitude d'un lieu A est, à 0 ou 24 heures près, l'excès de l'heure sidérale de l'observatoire de Greenwich sur l'heure sidérale du lieu A au même instant.

● REMARQUE. — Les longitudes positives sont encore appelées *Occidentales*; les longitudes négatives sont appelées *Orientales*.

■ **34. Applications.** — Nous savons que l'ascension droite α d'une étoile (ou d'un astre quelconque) détermine l'heure sidérale du lieu.

Si, au même moment, on note l'heure indiquée par un chronomètre donnant l'heure sidérale de Greenwich, on a immédiatement la longitude.

EXEMPLE. — Une étoile a pour ascension droite 7 h 24 mn. Quand elle passe au méridien du lieu de l'observation, le chronomètre donne l'heure de Greenwich : 17 h 55 mn.

La longitude est :

$$L = 17 \text{ h } 55 \text{ mn} - 7 \text{ h } 24 \text{ mn} = 10 \text{ h } 31 \text{ mn}$$

ou en degrés : + 157° 45' ou 157° 45' Ouest.

Si l'ascension droite α est 21 h 30 mn et que le chronomètre indique, à la culmination 5 h 20 mn la longitude est :

$$L = 5 \text{ h } 20 \text{ mn} - 21 \text{ h } 30 \text{ mn} + 24 \text{ h} = + 7 \text{ h } 50 \text{ mn}$$

ou en degrés : + 117° 30' ou 117° 30' Ouest.

La détermination de la longitude nécessite donc la connaissance de l'heure sidérale, *au même instant*, à Greenwich et au lieu considéré. Plusieurs procédés sont applicables ;

1° Un signal peut être émis par radiotélégraphie et capté par Greenwich. Si chaque observateur note l'heure sidérale au même instant, le problème est résolu.

Cette méthode s'applique entre observatoires.

2° On peut observer un phénomène céleste prévu à l'avance et visible de plusieurs observatoires : il remplace le signal radiotélégraphique. Citons : le commencement ou la fin d'une éclipse, les éclipses (fréquentes) des satellites de Jupiter, l'occultation de la Lune et d'une étoile, etc.

3° Pour un navigateur, il est indispensable d'avoir à bord des chronomètres qui permettent de conserver l'heure sidérale de Greenwich. On détermine l'heure sidérale du lieu par la détermination du moment où la hauteur d'un astre est maximum, ce qui se fait à l'aide d'un sextant. L'heure sidérale du lieu est alors donnée par l'ascension droite de l'astre observé qui peut être une étoile, le Soleil, la Lune, une planète. Cette heure est fournie par un recueil publié chaque année et appelé la *Connaissance des Temps*.

La transmission régulière de l'heure, par signaux horaires, qui peuvent être perçus sur toute la Terre, permet d'établir à bord la correction des chronomètres, s'il y a lieu. Elle permet actuellement la détermination facile des longitudes, problème qui donna tant de soucis aux astronomes et aux navigateurs des XVII^e et XVIII^e siècles.

■ 35. **Détermination de la latitude.** — La figure 47 montre le méridien d'un lieu A, limité aux pôles P et P'. (E) est la trace du plan de l'équateur sur le plan de figure. La verticale en A est perpendiculaire au plan H de l'horizon en ce lieu. Elle fait avec l'équateur l'angle égal à la latitude.

Menons de A la parallèle AP₁ à PP'. L'angle HAP₁ est égal à φ ses côtés étant perpendiculaires à ceux de l'angle = $\widehat{AIE}$.

Or, l'angle HAP₁ est la hauteur du pôle au-dessus de l'horizon. Cet angle est mesurable. D'où :

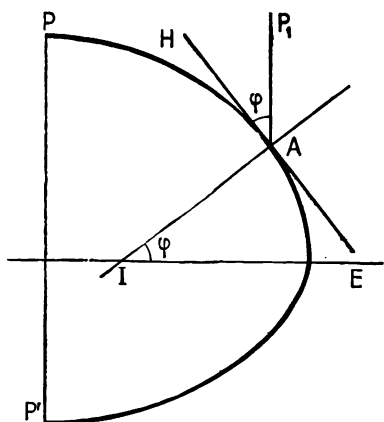


Fig. 47.

Théorème. — La latitude d'un lieu est la hauteur du pôle en ce lieu.

La latitude est positive si le pôle céleste visible est le pôle boréal; elle est négative si c'est le pôle austral.

On dit aussi : latitude Nord ou latitude Sud, au lieu de latitude positive ou négative.

Nous avons déjà montré comment on détermine la hauteur du pôle par la moyenne des hauteurs d'une étoile circumpolaire à ses deux passages successifs au méridien.

On sait aussi que la déclinaison δ d'une étoile est liée à la hauteur φ du pôle et à la distance zénithale z de l'étoile à sa culmination par l'une ou l'autre des relations :

$$\delta = \varphi + z; \quad \delta = \varphi - z.$$

L'observation du passage d'une étoile connue donne z ; on en déduit φ si l'on connaît δ .

EXEMPLE. — L'étoile *Altair* de l'*Aigle* a une déclinaison de $+8^{\circ} 44' 15''$

Un observateur note que sa distance zénithale à sa culmination est $35^{\circ} 43' 25''$, la culmination ayant lieu vers le sud. On prendra :

$$\begin{aligned} \delta &= \varphi - z \\ \varphi &= \delta + z = 8^{\circ} 44' 15'' + 35^{\circ} 43' 25'' \\ \varphi &= + 44^{\circ} 27' 40''. \end{aligned}$$

Le jour, on détermine la latitude par la hauteur du Soleil à sa culmination : ceci nécessite l'emploi d'une table des déclinaisons quotidiennes du Soleil. On pourrait se servir également de la hauteur de la Lune ou d'une planète avec une table appropriée des déclinaisons de ces astres.

En résumé, pour déterminer une latitude il faut avoir :

1° Un tableau des déclinaisons d'un certain nombre d'étoiles connues, ou des déclinaisons quotidiennes du Soleil, de la Lune ou des planètes visibles.

2° Un appareil de visée pour mesurer la distance zénithale (lunette méridienne ou théodolite) ou la hauteur de l'astre (sextant).

3° Un tableau des corrections à apporter aux hauteurs par suite de la réfraction atmosphérique.

● REMARQUES. — 1° La détermination des deux coordonnées se fait au même moment. En navigation, c'est *faire le point*.

Le résultat obtenu est valable à une demi-minute d'arc près, en longitude et en latitude pour les observations courantes.

2° Rien ne sera changé à la détermination de la latitude si la Terre n'est pas sphérique, car nous n'avons utilisé que la verticale et la direction du pôle céleste qui existent indépendamment de la forme de la Terre.

La détermination des coordonnées géographiques est indispensable aux géographes, aux navigateurs, aux explorateurs, aux aviateurs. On voit combien l'Astronomie est essentielle pour la connaissance de notre habitat terrestre.

EXERCICES

20. — L'heure sidérale de Rome avance de 40 mn 25 s sur l'heure sidérale de Paris. Quelle est la différence des longitudes de Rome et de Paris? La longitude de Paris est 2°20' E. Quelle est celle de Rome?

NOTA. — On peut reprendre les exercices proposés à la page 32, en remplaçant la donnée de la hauteur du pôle par celle de la latitude.

21. — Le pôle visible étant le pôle austral, trouver la latitude du point de la Terre où l'étoile α du Centaure culmine à une hauteur de 30° 25', sa déclinaison étant — 60° 38'.

22. — En un point de la Terre on relève la hauteur de Sirius à sa culmination : 8° 33' et l'heure de cette culmination 13 h 24 mn (heure sidérale de Greenwich). Sachant que les coordonnées équatoriales de Sirius sont 6 h 43 mn et — 16° 39', déterminer les coordonnées géographiques de ce point. Le pôle visible est le pôle boréal.

(On tiendra compte d'une correction de réfraction atmosphérique de 6' 30".)

3

FORME DE LA TERRE

■ 36. **Historique de la question.** — La détermination des méridiens comme lignes d'égales longitudes, a confirmé que la Terre est un solide de révolution autour de l'axe de ses pôles.

Il fut moins simple de vérifier si sa forme est sphérique.

DESCARTES, initiateur remarquable en raisonnement scientifique, pensait avoir démontré que la Terre est allongée, suivant l'axe polaire.

NEWTON, pour d'autres raisons excellentes, voulait qu'elle fût aplatie. Mais il n'est de bonne raison que de l'observation.

Si la terre est sphérique, chaque degré d'un méridien a la même longueur. Si elle est aplatie, un degré de méridien, c'est-à-dire la distance de deux points d'un méridien qui ont une différence de latitude de 1 degré, doit être plus court près de l'équateur que près d'un pôle (fig. 48).

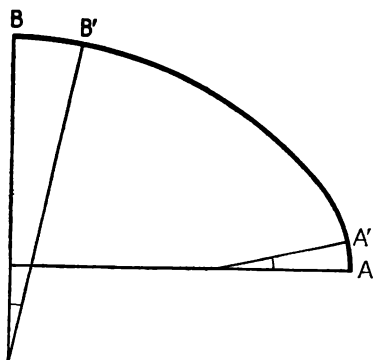


Fig. 48.

Pour le savoir, il fallait procéder à des mesures. Le XVIII^e siècle fut l'époque de ces recherches, qui n'aboutirent pas immédiatement à des conclusions incontestables.

Une mesure faite par JACQUES CASSINI, en 1718, avait pu faire conclure à l'allongement de la Terre, comme le voulait Descartes.

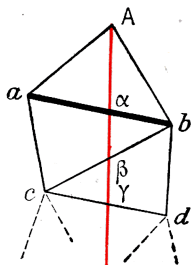
La dispute des *Cassiniens* et des *Newtoniens* aboutit à l'envoi de deux missions : l'une dirigée par MAUPERTUIS, assisté d'un jeune mathématicien de génie, CLAIRAUT, mesura un arc en Laponie (1736-1737), l'autre comprenant BOUGUER et LA CONDAMINE, en fit autant au Pérou (1735-1744). La conclusion fut que l'arc de 1 degré, long de 57 420 toises en Laponie n'avait que 56 750 toises au Pérou. L'aplatissement de la Terre était démontré.

Signalons la boutade de Voltaire qui pensa ridiculiser Maupertuis pour avoir

... découvert dans des lieux pleins d'ennui
Ce que Newton trouvait sans sortir de chez lui.

Voltaire commettait une erreur en confondant une hypothèse, même géniale, et sa vérification qui seule lui donne la valeur d'une réalité établie.

■ 37. Mesure d'un arc de méridien. — Soit AB un arc de méridien terrestre. La détermination des latitudes de A et de B donne en degrés la mesure de cet arc.



On choisit un certain nombre de points a, b, c, d , etc., v , bien visibles (clochers, arbres isolés ou mieux encore, signaux construits à cet effet sur des points élevés du terrain) (fig. 49).

On mesure alors : 1° au théodolite, par des visées horizontales tous les angles de cette figure ($\widehat{aA\alpha}$, $\widehat{\alpha Ab}$, $\widehat{Ab\alpha}$, $\widehat{abc}$, etc.).

2° La longueur de la projection horizontale d'une droite, ab par exemple, que l'on appelle une *base*.

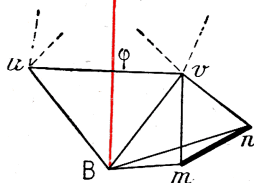


Fig. 49.

Un calcul trigonométrique permet d'en déduire les côtés du triangle Aab , puis ceux du triangle $A\alpha b$; de proche en proche on aura les longueurs $A\alpha$, $\alpha\beta$, $\beta\gamma$, ... φB , dont la somme donne la longueur de l'arc AB.

En principe, une seule mesure de longueur suffit. En réalité, on vérifie le calcul par l'adjonction d'une autre *base*, liée à la chaîne des triangles par des mesures d'angles, telle que mn par exemple.

Nous devons faire les remarques suivantes :

1° La mesure d'une base se fait maintenant suivant la technique mise au point par le Bureau International des Poids et Mesures, à l'aide des fils en alliage invar, pratiquement non dilatables. La précision est de 1 mm pour 1 km, soit, en erreur relative, de 10^{-6} .

2° Les mesures d'angles doivent tenir compte des différences d'altitude des stations (ce qui donne en même temps le nivellement, de proche en proche, par rapport à l'altitude d'une des stations). Elles doivent subir des corrections sur le détail desquelles nous n'entrerons pas.

3° Le calcul des longueurs des côtés doit se faire par les formules de la trigonométrie sphérique, car ces triangles ont pour côtés des arcs de cercle, au moins en première approximation.

On choisit les points d'observation de façon que les triangles soient sensiblement équilatéraux, les longueurs des côtés étant de 40 km environ. Quand on a prolongé la mesure du méridien central de la France jusqu'en Algérie, on a dû faire des visées de 270 km de longueur.

■ 38. Résultats. Forme et dimensions du géoïde. — Actuellement, de nombreux arcs de méridiens ont été mesurés, dans toutes les parties du monde :

l'arc anglo-franco-espagnol, des îles *Shetland* à *Ouargla*, embrasant 29° de latitude;

la méridienne côtière de l'Indochine (13°);

l'arc de l'Équateur (6°) mesuré de 1899 à 1906 par des officiers français;

l'arc de 30° du Cap au Caire;

l'arc russo-scandinave, du *Danube* à l'*Océan Glacial*,
et de nombreux arcs aux Indes et aux États-Unis.

Ces mesures et celles de plusieurs arcs de parallèles ont conduit une conférence internationale, en 1924, à adopter les résultats suivants :

- 1° Tous les méridiens sont égaux, de sorte que la Terre est un solide de révolution.
- 2° Un méridien terrestre a la forme d'une ellipse dont le petit axe est la ligne des pôles; la Terre a donc la forme d'un ellipsoïde de révolution.

Les nombres adoptés sont ceux qui ont été trouvés par l'astronome américain HAYFORD (1909). L'ellipsoïde ainsi défini s'appelle *l'ellipsoïde international*.

Posons, comme habituellement dans l'ellipse (fig. 50) :

$$OA = a; \quad OB = b.$$

Les résultats relatifs à l'ellipsoïde de Hayford sont :

$$a = 6\,378\,388 \text{ m}$$

$$b = 6\,356\,912 \text{ m.}$$

La différence est :

$$a - b = 21\,476 \text{ m.}$$

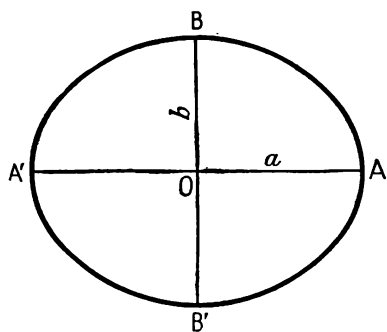


Fig. 50.

Le rapport $\frac{a-b}{a}$ s'appelle *l'aplatissement*. On a :

$$\frac{a-b}{a} = \frac{21\,476}{6\,378\,388} = \frac{1}{297}$$

Nous donnons ci-dessous les nombres relatifs à l'ellipsoïde international :

Quart du méridien	10 002 288 m
Circonférence équatoriale	40 076 594 m
Superficie de la Terre	$510\,101 \times 10^3 \text{ km}^2$
Volume de la Terre.	$1\,083\,320 \times 10^6 \text{ km}^3$
Rayon d'une sphère ayant même méridien . . .	6 367,6 km
Rayon d'une sphère ayant même volume . . .	6 371,2 km
Longueur d'un arc de méridien de 1° :	
de 0 à 1° de latitude.	110 576 m
de 49 à 50° —	111 233 m
de 89 à 90° —	111 700 m

■ 39. Nombres à retenir. — Le mètre, défini par la Convention, avait été construit de façon que le quart de méridien mesurât 10 millions de mètres.

→ Le mètre légal actuel (loi du 11 juillet 1903) est la longueur à 0° centigrade du prototype international en platine iridié, sanctionné par la conférence internationale des Poids et Mesures (Paris, 1889), et qui est déposé au pavillon de Breteuil à Sèvres. La copie n° 8 de ce prototype est l'étalon légal pour la France.

D'après les nombres du tableau précédent, cet étalon est inférieur de 228,8 microns à la dix-millionième partie du quart du méridien terrestre.

L'aplatissement de l'ellipse méridienne est très faible. Une sphère de 1 m de rayon, prise pour image de la Terre, aurait une ligne des pôles trop longue de moins de 7 mm, ce qui est insignifiant.

Nous pouvons donc retenir, dans une approximation suffisante pour de nombreuses applications, que la Terre est une sphère de 40 000 km de circonférence méridienne ou équatoriale. Son rayon est alors :

$$\frac{40\,000}{2\pi} = 6\,366 \text{ km.}$$

L'arc d'un degré d'un grand cercle de cette sphère aura pour longueur :

$$\frac{40\,000}{360} = 111,111 \text{ km}$$

c'est à peu près la valeur moyenne déduite du tableau précédent.

L'arc d'une minute a pour longueur :

$$\frac{111,111}{60} = 1,852 \text{ km.}$$

C'est le *mille marin*.

Ainsi, une erreur d'une demi-minute en latitude donne une erreur de 900 m environ sur la position du point. C'est la précision habituelle des mesures nautiques.

■ **40. Nivellement.** — La connaissance de la longitude et de la latitude fixe la position d'un point sur l'ellipsoïde de référence; pour avoir sa position sur la Terre, il faut en outre connaître son *altitude*.

● **L'altitude** est la hauteur du point au-dessus (ou au-dessous) du niveau de la mer, supposé prolongé sur tout le géoïde.

Le zéro est le niveau moyen de la Méditerranée, pris à Marseille dans l'anse du port Calvo (promenade de la Corniche).

La détermination des altitudes, ou *nivellement*, se fait de proche en proche à l'aide de niveaux et de mires. Les points de même altitude déterminent sur la Terre des *lignes de niveau*, dont la forme est compliquée et qui figurent sur les cartes. Ce sont les éléments essentiels de la représentation du relief terrestre.

Les altitudes de sommets inaccessibles se déterminent par des observations angulaires et un calcul trigonométrique. Voici quelques résultats (*Annuaire du Bureau des Longitudes, 1951*) :

1° Montagnes			
Mont Everest (Asie). . .	8 882 m	Kibo (Afrique).	6 040 m
Aconcagua (Am. Sud). .	7 040 m	Elbrouz (Europe). . . .	5 644 m
Mac-Kinley (Am. Nord).	6 240 m	Mont Blanc (France) . .	4 807 m
2° Dépressions			
Mer Morte (Asie) . . .	— 394 m	Chott el Gharsa (Afrique). —	23 m
Mer Caspienne (Asie). —	26 m	Lac Salton (Californie) . —	90 m

La profondeur des Océans est fort variable. On l'évalue à une moyenne de 4 000 m, avec des hauts fonds et des fosses dont voici les plus profondes.

Océan	φ	L	Profondeur	Situation
Atlantique . .	20° N	68° W	8 530 m	110 km NO de Porto-Rico
Océan Indien .	10° S	108° E	7 500 m	220 km S de Java
Pacifique. . .	10° N	127° E	10 793 m	110 km E des Philippines

L'étude des profondeurs marines est l'objet de mesures actuelles très actives, par l'emploi des ultra-sons qui se réfléchissent sur le fond de la mer (procédé Asdic).

Dans l'ensemble toutes ces dénivellations sont une faible fraction du rayon terrestre.

◀ LECTURES ▶

■ 41. La première mesure d'un arc de méridien. — Cette mesure est due à ERATOSTHÈNE, d'Alexandrie, vers 230 avant J.-C. Cette mesure reposait sur les observations suivantes :

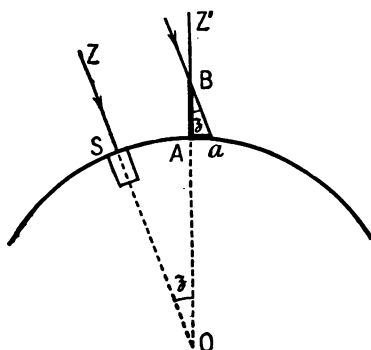


Fig. 51.

1° A *Syène* (aujourd'hui Assouan) près de la première cataracte du Nil, le Soleil se reflète au fond d'un puits vertical au 21 juin, à sa culmination : il est donc au zénith à ce moment.

2° A *Alexandrie*, le même jour, la mesure de la longueur minimum de l'ombre *Aa* d'un

obélisque vertical *AB* donne la distance zénithale *z* du Soleil (fig. 51).

Les droites *aB* et *SZ* étant supposées parallèles :

$$z = \widehat{AOS}.$$

Cet angle est la différence des latitudes des deux villes. L'arc *SA*, considéré comme un arc de méridien, a été ainsi évalué par Eratosthène à $\frac{1}{50}$ de cercle.

3° La distance d'Alexandrie à Syène était connue par les documents de la bibliothèque d'Alexandrie, dont notre savant était le bibliothécaire. Un cadastre avait été dressé pour l'Égypte et aussi des distances d'étapes établies pour les troupes d'occupation.

La distance qui ressortait de ces documents était égale à 5 000 stades. Le tour de la Terre est donc de 250 000 stades.

Le stade employé étant de 157,5 m, le méridien ainsi déterminé mesurerait 38 375 km.

Ce résultat est très remarquable ; les déterminations de distances auraient pu causer des surprises ; Alexandrie et Syène ne sont d'ailleurs pas exactement sur le même méridien. Mais c'est la première évaluation de la mesure de la Terre qui ait un caractère scientifique.

■ **42. Louis XIV et les astronomes.** — On ne saurait se représenter combien de grosses erreurs se trouvaient dans la carte de la France avant que l'Académie des Sciences eût entrepris de la réformer (1679). Les géographes mettaient entre Brest et Paris une différence en longitude de $8^{\circ}9'$: les observations réitérées de MM. PICARD et DE LA HIRE apprirent qu'elle n'était que de $6^{\circ}54'$ de sorte que cette pointe de la Bretagne était avancée dans la mer de plus de 30 lieues qu'il ne fallait. Il en était à peu près de même de toute la côte de l'Océan. La latitude de la plupart des villes méridionales du Royaume était marquée moindre qu'elle n'était, l'erreur atteignant un demi-degré aux frontières. M. DE LA HIRE, dressa une carte corrigée suivant ses observations et où ces différences étaient marquées. Lorsqu'il la présenta au Roi, ce Prince, qui voyait son domaine resserré de tous côtés, dit en badinant que son Académie lui témoignait bien peu de reconnaissance, puisque tandis qu'il la soutenait par sa protection et ses dépenses, elle diminuait l'étendue de sa domination. (D'après MONTUCLA, *Histoire des Mathématiques*, 1758.)

EXERCICES

NOTA. — Dans les exercices ci-dessous, on supposera la Terre sphérique, et on prendra 6 400 km pour mesure de son rayon.

23. — Calculer les longueurs des parallèles de la Terre ayant pour latitudes :

10° ; 30° ; 45° 60° ; 80° .

24. — Au même instant, l'heure sidérale en A est 12 h; elle est 15 h en B. 1° Quelle est la différence de longitude entre A et B. 2° Quel est le sens de cette différence? 3° A et B ayant même latitude $\varphi = 60^{\circ}$, quelle est la longueur de l'arc de parallèle qui les joint?

25. — Quelle distance faut-il parcourir à partir d'un point A de latitude $45^{\circ}11'20''$, sur un parallèle, pour arriver en un point B où l'heure sidérale avance d'une minute sur celle du point A? Dans quel sens faut-il se déplacer?

26. — Quelle est la latitude d'un parallèle passant par deux points A et B, si l'arc de parallèle AB mesure 250 km et si les longitudes de A et de B diffèrent de $3^{\circ}45'$?

27. — Un observateur se trouve sur une falaise à 80 m au-dessus du niveau de la mer. Quelle est la distance à laquelle il peut voir en mer?

28. — Calculer la surface de la Terre comprise :

1° entre les parallèles de latitudes 0 et 20° ;

2° entre les parallèles de latitudes 60° et 80° .

4

CARTES
GÉOGRAPHIQUES

■ 43. **Globe terrestre.** — L'image la plus simple que l'on puisse concevoir de la surface de la Terre est une image sphérique. Si cette image a un mètre de rayon, nous avons vu que la ligne des pôles n'est trop longue que de moins de 7 mm. On peut négliger cette différence et représenter la Terre par une sphère sur la surface de laquelle on pourra dessiner.

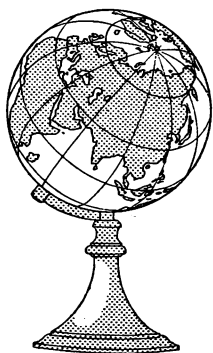


Fig. 52.

On choisira sur cette sphère le pôle Nord et on dessinera l'équateur. Puis, on marquera le pôle Sud, par des constructions simples effectuées sur la sphère. On tracera ensuite les parallèles et les méridiens.

Si on sait tracer un parallèle de latitude donnée et un méridien de longitude donnée, on saura représenter le lieu de la Terre dont les coordonnées sont cette longitude et cette latitude.

Par exemple, on pourra tracer les méridiens de 20° en 20° et les parallèles de 10° en 10° . On aura ainsi ce qu'on appelle un **réseau** de méridiens et de parallèles.

Si on reporte sur cette sphère les principales limites géographiques connues, on obtiendra un **globe terrestre** (fig. 52).

Ces globes sont en général mobiles autour de la droite qui joint les pôles. Cette droite est l'image de l'axe de la Terre. Nous verrons plus loin (n° 72) pourquoi il est incliné par rapport à l'axe du pied qui sert de support.

■ 44. **Cartes géographiques.** — Une carte géographique est une figure plane, transformée de la figure sphérique constituée par un globe terrestre. Ces cartes peuvent être pliées, reliées en atlas, et sont de ce fait beaucoup plus maniables qu'un globe sphérique. De plus, l'agrandissement de leur échelle n'est pas un obstacle à la commodité de leur emploi et permet la confection des cartes détaillées.

Mais il n'est pas possible de faire le développement d'une sphère sur un plan, comme on a appris en géométrie à le faire pour un cône ou un cylindre. On a donc dû employer plusieurs modes de représentations, dont aucun n'est parfait.

La transformation géométrique qui donne la carte à partir du globe étant définie, on se proposera de construire les transformées d'un méridien donné et d'un parallèle donné. Dans les exemples qui vont suivre, nous nous bornerons à construire les transformées des parallèles de 10° en 10° et les transformées des méridiens de 20° en 20° . Si on sait résoudre ce problème, on saura reporter sur la carte un lieu défini par ses coordonnées géographiques.

■ 45. Projection orthogonale sur le plan de l'équateur. —

Une transformation simple consiste à remplacer un hémisphère par sa projection orthogonale sur le plan de l'équateur. Les parallèles sont projetés suivant des cercles concentriques, les méridiens suivant des diamètres de ces cercles.

La figure 53 montre, sans qu'il soit nécessaire de l'expliquer, la construction du

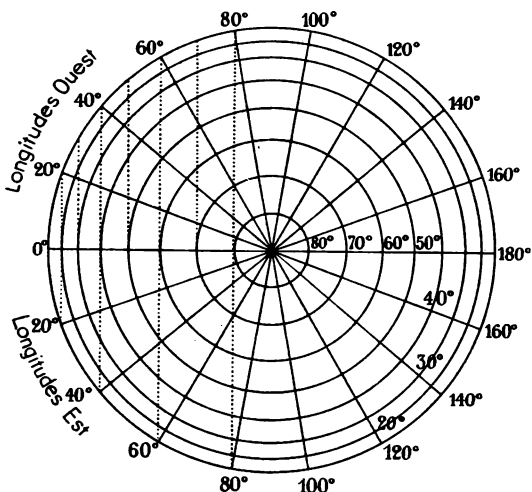


Fig. 53. — Projection orthogonale sur le plan de l'équateur.

réseau, pour la projection orthogonale de l'hémisphère nord sur le plan de l'équateur. On n'a pas tracé le parallèle de 10° de latitude pour que la figure reste claire.

On constate, sur ce dessin, que les régions voisines du pôle sont peu déformées, alors que les régions voisines de l'équateur le sont beaucoup. Une telle projection peut donc servir à établir une carte des régions polaires sans déformation trop grande.

■ 46. Projection orthogonale sur le plan d'un méridien. —

La figure 54 montre la Terre et le méridien PEP'E' sur lequel on va projeter orthogonalement le réseau. L'équateur EE' se projette suivant une droite perpendiculaire à la ligne des pôles ainsi que les divers parallèles. La latitude se mesurera sur le méridien sur lequel on projette.

Le méridien PAP', perpendiculaire au méridien sur lequel on

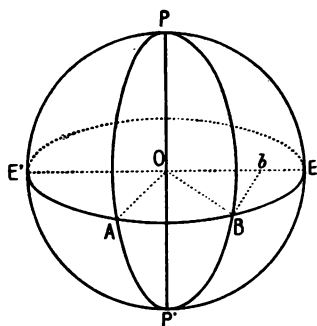
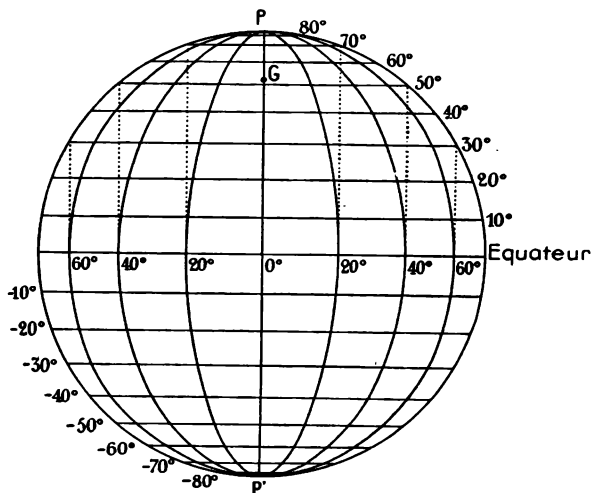


Fig. 54.

projette, se projette suivant la ligne des pôles. Le méridien PBP' se projette suivant une ellipse dont on a immédiatement le sommet b . Cette ellipse peut se déduire du méridien PEP' par les constructions connues de géométrie¹.

La figure 55 montre la construction du réseau pour la projection orthogonale sur le méridien correspondant aux longitudes de $+90^\circ$ et de -90° de l'hémisphère contenant Greenwich. On n'a pas dessiné les méridiens correspondant aux longitudes de 80° . On a marqué par la lettre G la position de Greenwich.

Fig. 55. — Projection orthogonale sur le plan du méridien 90° E. et 90° W.

Dans cette projection, seule la région centrale n'est pas trop déformée. Les autres le sont beaucoup.

■ 47. **Projection stéréographique.** — La projection stéréographique est un cas particulier de l'inversion². Elle a le grand avantage de transformer un cercle en un cercle ou en une droite et de se prêter par suite à des tracés simples.

1. *Cours de Géométrie*, p. 338.

2. *Cours de Géométrie*, p. 280.

Soit PP' un diamètre d'une sphère (fig. 56), EE' le grand cercle qui admet PP' pour axe. Soit A un point de la sphère. La droite PA coupe le plan du grand cercle en un point a . Le point a est la projection stéréographique du point A .

On se borne à projeter l'hémisphère qui contient le point P' diamétralement opposé à P . De cette manière, les divers points

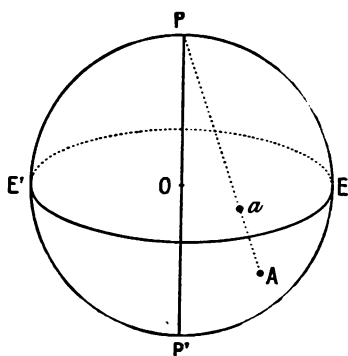


Fig. 56.

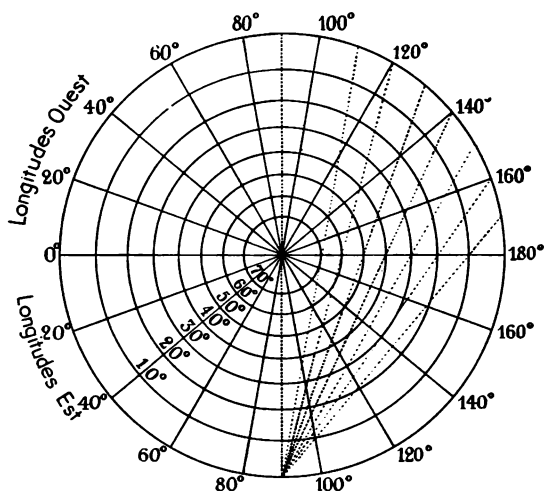


Fig. 57. — Projection stéréographique sur le plan de l'équateur.

de cet hémisphère se projettent à l'intérieur du grand cercle.

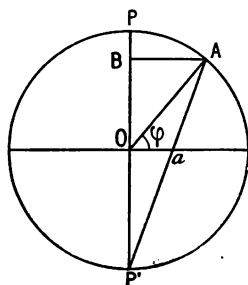


Fig. 58.

■ 48. Projection stéréographique de l'hémisphère nord, faite du pôle sud, sur le plan de l'équateur.

Les méridiens se projettent suivant des rayons de l'équateur et les parallèles se projettent suivant des cercles.

La figure 57 montre la construction du réseau qui est immédiate. On n'a pas tracé le parallèle de 80° de latitude.

Si AB est le rayon du parallèle de

latitude φ , le rayon de sa projection stéréographique est Oa (fig. 58). On a :

$$\frac{Oa}{AB} = \frac{P'O}{P'B} = \frac{1}{1 + \sin \varphi}.$$

Le rapport varie donc de 1 à $\frac{1}{2}$ quand on passe de l'équateur au pôle.

La transformation, qui est une inversion, conserve les angles. C'est pourquoi on l'appelle une représentation **conforme**.

■ 49. Projection stéréographique sur le plan d'un méridien.

— Considérons, par exemple, le méridien formé par les deux demi-cercles de longitudes -90° et $+90^\circ$ et proposons-nous de faire la carte, en projection stéréographique, de l'hémisphère qui contient Greenwich (fig. 59).

Le pôle de l'inversion est le point Q de l'équateur dont la longitude est 180° .

Les deux méridiens de $+90^\circ$ et -90° de longitude sont conservés, le méridien origine est projeté suivant la ligne des pôles.

Les divers méridiens sont projetés suivant des cercles qui passent par les points P et P' .

Les parallèles sont projetés suivant des cercles orthogonaux aux précédents, c'est-à-dire suivant des cercles du faisceau dont les points limites sont P et P' , puisque, dans l'espace, les méridiens et les parallèles se coupent à angle droit.

Il est ainsi facile de construire le réseau.

La figure 60 montre le méridien conservé et la ligne des pôles $P'P$. L'équateur est projeté suivant le diamètre EE' perpendiculaire à $P'P$.

Pour construire, sur la carte, le parallèle de latitude φ , on marque le point A tel que l'angle EOA soit égal à φ .

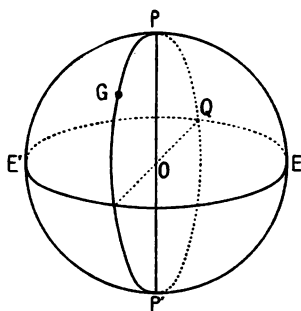


Fig. 59.

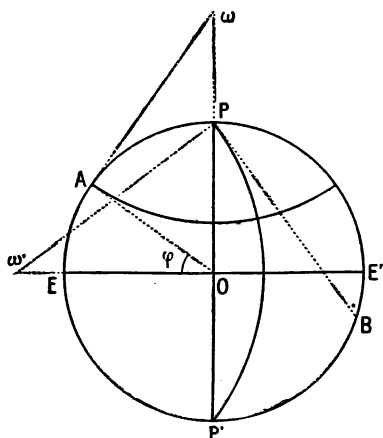


Fig. 60.

Le cercle cherché a son centre sur $P'P$ et est orthogonal en A au méridien conservé. Son centre ω est l'intersection de PP' et de la tangente en A .

Le méridien de longitude L fait, dans l'espace, un angle de L degrés avec le méridien origine. Cet angle est conservé dans la transformation. Ce méridien est donc représenté par un arc de cercle qui passe par P et P' et qui fait, avec la droite $P'P$, l'angle L . On tracera donc la droite PB telle que l'angle BPP' soit égal à L ; on

mènera en P la perpendiculaire à PB qui coupe l'équateur en ω' . Le point ω' est le centre de l'arc de cercle cherché.

On ne conserve des méridiens et des parallèles que les arcs intérieurs au méridien sur lequel la projection est faite.

La figure 61 représente le réseau construit par cette méthode.

Les deux cartes ci-dessous représentent une même moitié de la Terre; l'une est une *projection orthogonale*, l'autre une *projection stéréographique*.

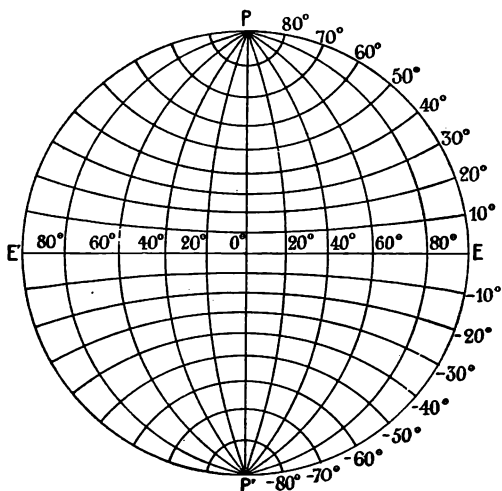


Fig. 61. — Projection stéréographique sur le plan du méridien 90° E. et 90° W.

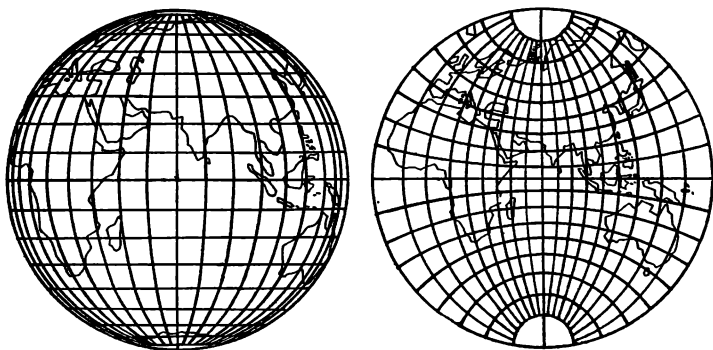


Fig. 62. — Projections du même hémisphère.
I. En projection orthogonale. II. En projection stéréographique.

■ 50. Développement cylindrique. Carte de Mercator. —

On peut supposer qu'un cylindre est circonscrit à la Terre le long de l'Équateur. Les plans méridiens couperont le cylindre suivant des génératrices; les plans parallèles le couperont suivant des cercles. Le développement du cylindre donnera un quadrillage irrégulier où les méridiens ont pour image des droites équidistantes, mais où les parallèles donnent des droites de même longueur que l'Équateur. Suivant une propriété de l'aire

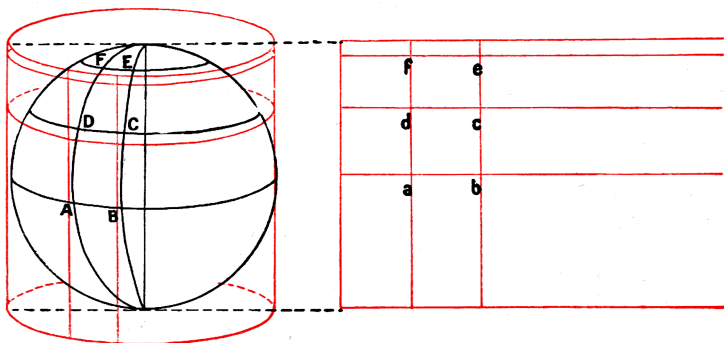


Fig. 63. — Développement cylindrique.

de la zone, les aires sont conservées (ABCD et *abcd* ont même aire), mais les déformations deviennent considérables dès qu'on s'éloigne de l'Équateur.

MERCATOR¹ a eu l'idée de dilater les méridiens, à mesure qu'on s'éloigne de l'Équateur, de façon que l'échelle soit, en chaque point, proportionnelle à $\frac{1}{\cos \varphi}$, φ étant la latitude du point. En effet, à la latitude φ , la longueur du parallèle est $2\pi R \cos \varphi$. Si on le représente par $2\pi R$, c'est donc que l'échelle relative à ce parallèle est $\frac{1}{\cos \varphi}$. Elle deviendrait infinie auprès des pôles.

Cette dilatation de l'échelle avec la latitude fait que la distance d'un parallèle à l'Équateur est, pour la carte de Mercator, proportionnelle à $\log \operatorname{tg} \left(45^\circ + \frac{\varphi}{2} \right)$.

L'intérêt de cette représentation, conçue pour les besoins de la navigation, est que *les angles sont conservés*; c'est une représentation **conforme**. La droite qui joint sur la carte deux

1. MERCATOR, nom latin de KRÖMER, géographe flamand du xvi^e siècle.

points quelconques coupe les méridiens sous le même angle : elle est l'image d'une courbe de la Terre qui coupe tous les méridiens sous cet angle. Cette courbe, appelée **loxodromie**, est celle que suit un bateau, navigant en maintenant sa direction de façon qu'elle fasse avec celle de la boussole un angle constant, ce qu'on appelle le *cap* du bateau.

La longueur de la loxodromie est plus grande que celle de l'arc de grand cercle qui joint ses extrémités : l'écart n'est pas négligeable ; aussi la navigation moderne se fait de plus en plus suivant l'arc de grand cercle, ou au plus près de cet arc. Après avoir tracé l'arc de grand cercle sur une carte en projection de Mercator, on trace un certain nombre de ses cordes dont chacune représente un morceau de loxodromie. Le changement de cap, au lieu d'être continu, comme il devrait l'être pour suivre l'arc de grand cercle, se fait donc à intervalles déterminés.

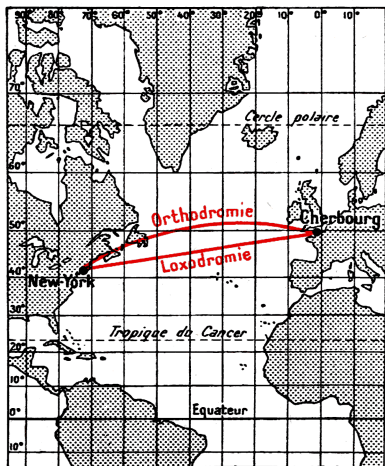


Fig. 64. — Développement de Mercator.

Dans certains parcours, la navigation suivant l'arc de grand cercle peut faire gagner **10 p. 100** sur le trajet suivant la loxodromie.

EXEMPLE. — Distance du Havre à New York :
 suivant la loxodromie, **5 365 km** ;
 suivant l'arc de grand cercle, **5 200 km**.

La figure 64 représente une partie de l'Atlantique en développement de Mercator. La *loxodromie* et l'arc de grand cercle ont été tracés de Cherbourg à New York. L'arc de grand cercle (ou *orthodromie*), plus long sur la carte, est en réalité plus court que la loxodromie.

■ **51. Développement conique. Carte de Lambert.** — On peut imaginer un cône circonscrit à la Terre suivant un parallèle autre que l'Équateur. Les plans des méridiens découpent sur ce cône des génératrices.

En développant le cône, le parallèle de contact se développe suivant un cercle ayant pour rayon l'apothème AS du cône. Tous les méridiens sont représentés par des droites concourantes.

La représentation dite de LAMBERT¹ emploie un développement conique; les parallèles se développent suivant des cercles concentriques. L'espacement de ces arcs est régi par une loi analogue à celle qui a été donnée pour le développement de Mercator, mais qui se traduit par une formule plus complexe, surtout en ce qui concerne l'ellipsoïde de

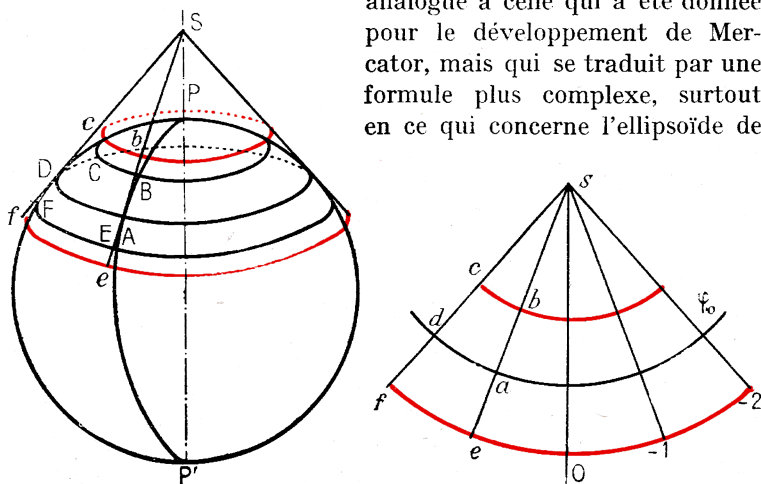


Fig. 65. — Développement conique.

révolution. Elle conserve les angles : c'est une représentation *conforme*.

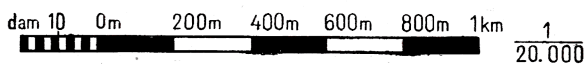
C'est ce mode de représentation qui est adopté pour la nouvelle carte de France au $\frac{1}{20\,000}$ et au $\frac{1}{50\,000}$. Afin de réduire encore les déformations, on a limité le champ d'application du développement en partageant la France en 3 zones. Le méridien central est celui de Paris; les parallèles de contact sont ceux dont les latitudes sont 49 gr, 52 gr et 55 gr. Les déformations sont très réduites : 1/5 000 au maximum pour les longueurs, quelques secondes d'arc pour les angles.

Commencée en 1900, la carte sera terminée, au rythme actuel des travaux, en 1980. Mais la France aura été dotée d'un nouveau réseau géodésique de haute précision, qui évitera aux ingénieurs de tous les grands travaux publics des mesures longues et onéreuses.

Au 1^{er} janvier 1956, le relevé de 3 444 coupures simples de la carte au $\frac{1}{20\,000}$ était terminé; 730 coupures étaient en cours d'exécution. Il restait à en lever 3 618.

Notons que l'emploi de photographies aériennes, prises par bandes parallèles dont chacune recouvre la moitié de la précé-

1. LAMBERT, mathématicien et astronome, né à Mulhouse (XVIII^e siècle).



MAILLARD-MILLET. — Cosmographie (Math.).

dente, a rendu beaucoup plus rapides les travaux de topographie pour l'établissement de cette carte. Le tracé des courbes de niveau peut même être fait d'après des couples de photographies, en vision stéréoscopique.

◀ LECTURE ▶

■ 52. **Histoire succincte des cartes de France.** — La première carte détaillée de la France, basée sur une triangulation sphérique, fut entreprise par CASSINI en 1750 et achevée en 1789, à l'échelle de $\frac{1}{86\,400}$. Déjà, Napoléon s'aperçut de ses défauts et décida en 1808 de la refaire entièrement, mais son projet n'aboutit pas.

En 1824, le ministère de la Guerre fit commencer la carte au $\frac{1}{80\,000}$, en noir, bien connue sous le nom de **carte d'État-Major**. Elle ne fut achevée qu'en 1878; elle fut depuis révisée et mise à jour par le *Service géographique de l'Armée*.

Cette carte est un développement conique modifié, dit *de Bonne*, conservant les longueurs sur les méridiens et les parallèles, et les aires. Mais les angles sont d'autant plus déformés qu'on s'éloignait davantage du méridien central.

La carte d'État-Major devint insuffisante pour les besoins militaires pendant la guerre 1914-1918. Dès 1915, le Service géographique de l'armée lui substitua des *plans directeurs* au $\frac{1}{20\,000}$.

En 1922, sous l'impulsion du général Bellot, on décida de faire le nouveau levé, en projection de Lambert, au $\frac{1}{20\,000}$, d'où l'on déduirait la carte au $\frac{1}{50\,000}$.

En 1940, le Service géographique de l'Armée dut être supprimé. Mais il fut transformé en un organisme civil, l'**Institut géographique national**, rattaché au ministère des Travaux publics. C'est cette organisation qui poursuit l'exécution de la carte au $\frac{1}{20\,000}$, depuis les travaux géodésiques jusqu'au tirage de la carte.

« Qu'il s'agisse des délicates techniques de la géodésie, de la topographie, de la photogrammétrie, de la cartographie, ses ingénieurs comptent parmi les meilleurs. Ses productions cartographiques peuvent rivaliser avec les plus belles productions étrangères, non seulement pour leur précision, mais aussi pour leur présentation. »

(Général Hurault, *directeur de l'Institut géographique national*.)

On sera peut-être étonné de ne pas voir citer ici les cartes les plus répandues et que chaque automobiliste consulte fréquemment. Elles sont très utiles et adaptées à leur objet; mais le travail fondamental,

le levé géodésique du pays, a été fait pour les cartes dont il vient d'être question.

Il existe une carte internationale au millionième : le système de projection employé utilise plusieurs développements coniques, ce qui permet l'assemblage correct des feuilles d'une même zone. Des conventions internationales ont décidé l'établissement d'une nouvelle carte au millionième pour les besoins de la navigation aérienne. Elle sera en projection de Lambert.

EXERCICES SUR LE CHAPITRE II

29. — Le méridien terrestre étant une ellipse d'aplatissement

$$\frac{a-b}{a} = \frac{1}{297},$$

calculer l'excentricité de cette ellipse.

30. — En supposant la Terre sphérique, calculer la longueur des arcs de parallèles correspondant à une différence de longitude de 1° pour les latitudes 20° , 40° , 60° , 80° . Prendre $\pi R = 20\,000$ km.

31. — La Terre étant supposée sphérique, on considère un fuseau formé par deux méridiens dont les longitudes diffèrent de 10° . Quelle est l'aire de ce fuseau? Quelle serait l'aire de la portion de ce fuseau comprise entre les parallèles de latitude 40° et 50° ? Entre les parallèles de latitude φ et φ' (toutes deux positives).

32. — Sur la carte d'État-Major au $\frac{1}{80\,000}$, deux points A et B sont distants de 125 mm. Quelle est la distance de ces deux points d'après la carte? Ces points se trouvant dans la région Est de la carte, on estime que leur distance n'est approchée qu'à $\frac{1}{400}$. Entre quelles limites leur vraie distance est-elle comprise? Comment faut-il modifier cette réponse si l'on admet en plus que la mesure de distance, sur la carte, n'a été faite qu'à 1 demi-millimètre près?

33. — Si la Terre était sphérique, un de ses points A aurait pour latitude φ . On trace le méridien passant par A et on le prend pour cercle principal de l'ellipse ayant pour demi grand axe a le rayon équatorial et pour demi petit axe b la longueur résultant de la donnée de l'aplatissement : $\frac{a-b}{a} = \frac{1}{297}$.

On fait correspondre, par affinité, au point A du cercle le point A_1 de l'ellipse, situé du même côté du grand axe. Ce point de l'ellipsoïde terrestre aurait une latitude φ_1 . Trouver la relation qui lie $\operatorname{tg} \varphi$ et $\operatorname{tg} \varphi_1$.

La normale en A_1 coupe le grand axe en O_1 . Calculer OO_1 , O étant le centre du cercle.

34. — Dans une carte en projection de Lambert, on a pris le parallèle $\varphi = 52$ gr comme parallèle de contact. Calculer la longueur de la génératrice du cône en fonction de R, rayon de la Terre supposée sphérique. Quelle est la longueur du parallèle de 52 gr? Quel est l'angle du développement, étendu à tout le cône? Quel est l'angle, sur la carte, de deux droites représentant deux méridiens dont la longitude diffère de 1 grade?

CHAPITRE III

LE SOLEIL

- 1. *Déplacement apparent du Soleil.*
- 2. *Inégalité des jours et des nuits.*
- 3. *Trajectoire apparente du Soleil. Orbite terrestre.*
- 4. *Mesure du temps.*
- 5. *Le calendrier.*

1

DÉPLACEMENT APPARENT DU SOLEIL

■ **53. Mouvement diurne.** — Dans notre hémisphère, le Soleil se lève à l'Est, culmine à son passage au méridien, dans la direction du Sud, et se couche à l'Ouest. Le passage au méridien détermine le *midi vrai*. L'ombre d'un objet vertical, éclairé par le Soleil, est alors dirigée vers le Nord. Elle est d'autant plus courte que la hauteur du Soleil est plus grande, ce qui donne un procédé commode pour déterminer, le jour, la direction Nord-Sud en un lieu.

La durée du *jour solaire vrai* est l'intervalle de temps qui sépare deux *midi vrais* consécutifs. Cette durée, d'ailleurs variable, est supérieure de 4 minutes environ à celle du jour sidéral. Cela suffit pour conclure que le Soleil n'occupe pas un point fixe sur la Sphère céleste.

■ **54. Le zodiaque.** — Si l'on marque chaque jour la position du Soleil sur une carte du Ciel, on le voit se déplacer successivement parmi des constellations qui, connues depuis plusieurs millénaires, constituent le *zodiaque*¹. Les Chaldéens, les Égyptiens, ont laissé des dessins du zodiaque et de ses constellations, au nombre de 12, dont les noms sont :

le *Bélier*, le *Taureau*, les *Gémeaux*, le *Cancer*, le *Lion*,

1. Le mot *zodiaque* vient du grec *zodios*, figure d'animal. La plupart des constellations du zodiaque portent des noms d'animaux.

la *Vierge*, la *Balance*, le *Scorpion*, le *Sagittaire*, le *Capricorne*, le *Verseau* et les *Poissons*.

On remarque, dans ces constellations, les belles étoiles : *Aldebaran* (α du Taureau), *Castor* et *Pollux* (α et β des Gémeaux), *Régulus* (α du Lion), l'*Épi* (α de la Vierge), *Antarès* (α du Scorpion).

Le Soleil semble donc parcourir une zone de la sphère céleste. L'astronome grec HIPPARQUE, soucieux de précision, avait divisé la zone zodiacale en 12 tranches, ou signes du zodiaque, de 30 degrés chacune, et donné à chacune de ces tranches, le nom de la constellation qui l'occupait. Lorsque les 12 signes étaient parcourus, une *année* s'était écoulée.

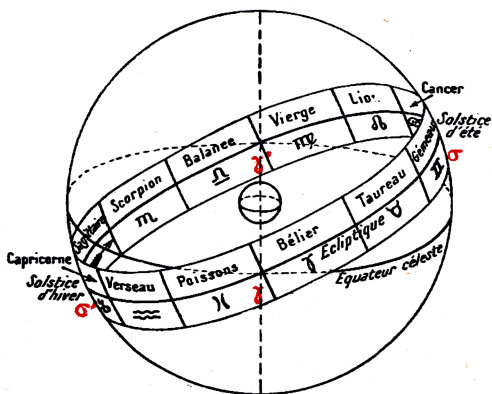


Fig. 67. — Les signes du Zodiaque.

Nous verrons plus loin que les constellations ne sont plus, actuellement, dans les signes indiqués par HIPPARQUE.

■ 55. **Ascension droite et déclinaison du Soleil.** — Pour préciser le déplacement apparent, on peut déterminer chaque jour les coordonnées équatoriales du Soleil.

Ces déterminations peuvent se faire avec une lunette méridienne, comme pour une étoile, en prenant le soin de protéger l'œil par des verres foncés, placés devant l'oculaire. Elles sont relatives au centre du disque solaire. La hauteur du centre est la moyenne arithmétique des hauteurs des bords inférieur et supérieur du disque. L'heure sidérale de passage au méridien du centre est la demi-somme des heures de passage des deux points du disque où la tangente paraît verticale.

Les résultats de ces mesures sont les suivants :

- 1^o L'ascension droite du Soleil augmente environ de 1 degré par jour.
- 2^o La déclinaison du Soleil varie suivant une loi périodique.

Elle est *nulle* aux environs du 21 mars, croît jusqu'à atteindre 23°27' vers le 21 juin; elle décroît alors, jusqu'à — 23°27' vers

le 22 décembre, et croît pour redevenir nulle au 21 mars de l'année suivante.

■ 56. **Écliptique.** — En marquant sur une carte du Ciel, les points dont les coordonnées sont celles du centre du Soleil, de jour en jour, on détermine une ligne qui donne la trajectoire apparente du centre du Soleil sur la Sphère céleste. On trouve

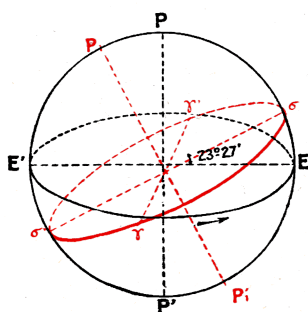


Fig. 68. — L'écliptique.

ainsi un grand cercle de la sphère, incliné de $23^{\circ}27'$ sur le plan de l'équateur. Ce cercle a été tracé sur la carte du Ciel, pages 104 et 105. Une de ses moitiés est dans l'hémisphère boréal, l'autre dans l'hémisphère austral. Il passe au milieu des constellations zodiacales.

Cela ne veut pas dire que le Soleil est sur la Sphère céleste; c'est sa projection sur la sphère que nous avons ainsi notée. La trajectoire apparente du Soleil est dans un plan, qui s'appelle le plan de l'écliptique. C'est tout ce que nous pouvons dire pour l'instant. Mais ce résultat est déjà suffisant pour permettre d'expliquer ou de définir :

- 1^o la durée de l'année,
- 2^o les saisons,
- 3^o les zones géographiques,
- 4^o l'inégalité des jours et des nuits.

● **L'écliptique** est le grand cercle de la Sphère des fixes dans le plan duquel le Soleil a sa trajectoire apparente.

Ce cercle a reçu le nom d'écliptique parce que les éclipses se produisent quand la Lune en est suffisamment voisine.

L'écliptique coupe l'équateur en deux points, γ et γ' (fig. 68).

- Le point γ , où la déclinaison est nulle, mais **croissante**, est le point **vernal** ou **équinoxe de printemps**.
- Le point γ' , où la déclinaison est nulle, mais **décroissante**, est l'**équinoxe d'automne**.
- La ligne $\gamma\gamma'$ est la **ligne des équinoxes**. C'est le point γ que l'on prend pour **origine des ascensions droites**.
- Le diamètre de l'écliptique perpendiculaire à la ligne des équinoxes s'appelle la **ligne des solstices**.

Il coupe l'écliptique en deux points σ et σ' appelés *solstices*. Le point σ , dont la déclinaison est $+23^{\circ}27'$ est le *solstice d'été*; le point σ' , dont la déclinaison est $-23^{\circ}27'$, est le *solstice d'hiver*.

■ 57. **Coordonnées écliptiques.** — L'écliptique est un grand cercle de la Sphère des fixes. On peut s'en servir pour définir un nouveau système de coordonnées, dit *coordonnées écliptiques*; ce système sera particulièrement utile pour repérer la position du Soleil, de la Lune et des Planètes, astres mobiles mais qui restent au voisinage de l'écliptique.

Soit (ϵ), l'écliptique (en rouge sur la fig. 69) orientée dans le sens du mouvement apparent du Soleil. L'axe perpendiculaire est la ligne des *pôles de l'écliptique*, orienté positivement de façon que le mouvement du Soleil soit de sens direct. Le pôle Nord P_1 de l'écliptique est donc à $23^{\circ}27'$ du pôle boréal P de la Sphère céleste.

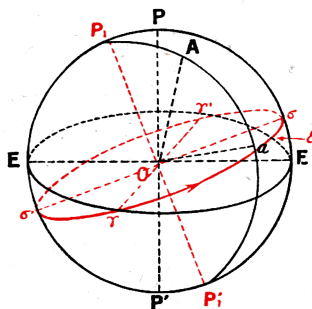


Fig. 69.

La position d'un astre A peut alors être définie par sa *longitude* et par sa *latitude célestes*, comme un point de la Terre l'est par sa *longitude* et sa *latitude géographiques*.

Les longitudes célestes sont comptées à partir du point γ , dans le sens direct, sur l'écliptique, de 0 à 360° .

Les latitudes célestes sont comptées à partir de l'écliptique, de 0 à 90° , positivement vers le pôle boréal de l'écliptique, négativement vers le pôle austral de l'écliptique.

Ainsi, l'astre A (fig. 69) a sa longitude céleste exprimée par la mesure de l'angle $(O\gamma, Oa)$; il a sa latitude céleste exprimée par la mesure de l'angle (Oa, OA) .

La longitude et la latitude célestes se déduisent, par un calcul, que nous ne pouvons indiquer ici, des coordonnées équatoriales. Nous verrons, au n° 107, l'intérêt de ces nouvelles coordonnées.

■ 58. **Détermination du point γ .** — Aucune étoile ne marque ce point dans le Ciel. Sa détermination précise est importante puisque, γ étant l'origine des ascensions droites, l'horloge sidérale doit marquer 0 h quand γ passe au méridien. Déterminer γ , c'est donc, en réalité, régler l'horloge sidérale.

Soit (E) le plan de l'équateur céleste, P le pôle boréal, S la

position de Soleil. Le cercle horaire du Soleil coupe (E) en S'. Soit γ le point vernal.

On a : $(O\gamma, OS') = \alpha$ (ascension droite de S)
 $(OS', OS) = \delta$ (déclinaison de S).

Les plans POS' et S'O γ étant perpendiculaires, si l'on projette S en s sur OS' et en A sur O γ , sA est perpendiculaire à O γ , et l'angle sAs est l'angle plan du dièdre formé par le plan de l'écliptique et par celui de l'équateur, soit ϵ , inclinaison de l'écliptique sur l'équateur.

On a donc :

$$\sin \alpha = \frac{As}{Os} = \frac{sS \cotg \epsilon}{Os} = \tg \delta \cotg \epsilon.$$

ϵ est un nombre connu ($23^{\circ}27'$), égal à la déclinaison du Soleil au moment du solstice. Il ne varie que très lentement ($47''$ par siècle).

δ peut se mesurer directement, *tous les jours*, à midi vrai.

La formule : $\sin \alpha = \tg \delta \cotg \epsilon$

permet donc de calculer chaque jour l'ascension droite du Soleil, donc l'heure que doit indiquer l'horloge sidérale au moment du passage du Soleil au méridien. Ces observations faites régulièrement permettent d'établir un graphique de correction de l'horloge.

C'est l'horloge, ainsi corrigée, qui permet de fixer à tout instant la position du point γ .

● REMARQUE. — La correction précédente manque de précision aux alentours des solstices, l'angle α étant alors voisin de 90° . Mais elle peut être faite par l'observation d'étoiles dites *fondamentales*, pour lesquelles α a été déterminé.

■ 59. **Durée de l'année.** — On appelle **année tropique** l'intervalle moyen de temps qui s'écoule entre deux passages successifs du Soleil à l'équinoxe de printemps.

Si l'on compte le nombre de jours solaires vrais contenus dans une longue suite d'années, une division montre qu'une année tropique contient une moyenne de 365,2422 jours solaires. Nous retiendrons ce nombre.

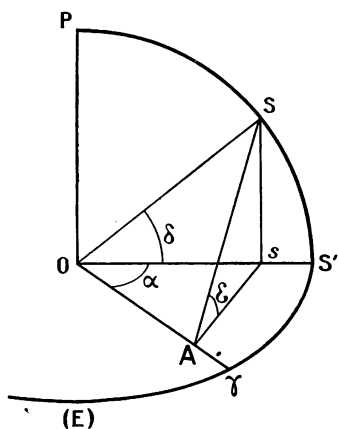


Fig. 70.

L'année tropique ne varie que très lentement, diminuant de 0,53 s par siècle.

■ **60. Les saisons.** — L'année tropique se divise en quatre saisons, correspondant aux quatre divisions de l'écliptique.

1° Au **printemps**, la déclinaison du Soleil est *positive et croissante*. Le Soleil parcourt alors l'arc $\gamma\sigma$, de l'équinoxe de printemps au solstice d'été.

2° L'**été**, la déclinaison du Soleil est *positive et décroissante*. Le Soleil parcourt l'arc $\sigma\gamma'$, du solstice d'été à l'équinoxe d'automne.

3° L'**automne**, la déclinaison est *négative et décroissante*. Le Soleil parcourt l'arc $\gamma'\sigma'$, de l'équinoxe d'automne au solstice d'hiver.

4° L'**hiver**, la déclinaison est *négative et croissante*. Le Soleil parcourt l'arc $\sigma'\gamma$, du solstice d'hiver à l'équinoxe de printemps.

■ **61. Zones géographiques.** — Lorsque le Soleil atteint la déclinaison de $+23^{\circ}27'$, il se trouve au zénith quand il passe au méridien du point A qui a précisément cette latitude (fig. 71).

Le lieu des points de la Terre pour lesquels le Soleil passe au zénith le jour du solstice d'été est le parallèle de latitude $23^{\circ}27' N$. On l'appelle le **tropique du Cancer**.

Les points de latitude $23^{\circ}27' S$ forment le **tropique du Capricorne**.

Le Soleil passe au zénith de ces points au solstice d'hiver.

A ce même solstice d'hiver, le Soleil reste à l'horizon du point B dont la latitude est $66^{\circ}33' N$, complément de $23^{\circ}27'$, car l'horizon de B est alors parallèle au rayon OA' . Le Soleil est donc circumpolaire, pendant une période de l'année, pour tous les points qui ont une latitude supérieure à $66^{\circ}33' N$, ou inférieure à $66^{\circ}33' S$. Les cercles qui ont ces latitudes sont les **cercles polaires**. Nous distinguerons :

le cercle polaire boréal ou arctique : $\varphi = 66^{\circ}33' N$.

le cercle polaire austral ou antarctique : $\varphi = 66^{\circ}33' S$.

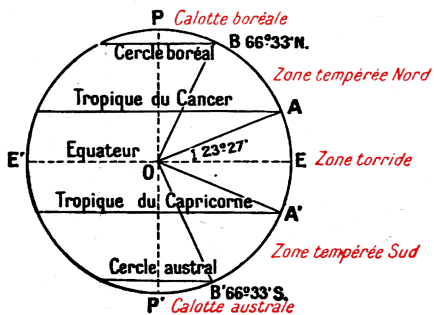


Fig. 71.

Les cercles polaires et les tropiques divisent la Terre en cinq **zones géographiques** :

1° La **zone boréale** ou *calotte boréale* s'étend du pôle nord au cercle polaire boréal.

La latitude y est supérieure à $66^{\circ} 33' \text{ N}$; le Soleil y est circumpolaire pendant une partie de l'année.

2° La **zone tempérée nord** s'étend du cercle polaire boréal au tropique du Cancer.

$$23^{\circ} 27' \text{ N} < \varphi < 66^{\circ} 33' \text{ N}.$$

Le Soleil se lève et se couche toute l'année, mais ne passe pas au zénith.

3° La **zone torride** ou *équatoriale* s'étend du tropique du Cancer au tropique du Capricorne.

$$- 23^{\circ} 27' < \varphi < + 23^{\circ} 27'.$$

Cette zone est partagée en son milieu par l'équateur de la Terre. Le Soleil passe au zénith de tous ses points à un moment de l'année.

4° La **zone tempérée sud** s'étend du tropique du Capricorne au cercle polaire austral.

$$- 66^{\circ} 33' < \varphi < - 23^{\circ} 27'.$$

Elle a les mêmes caractéristiques que la zone tempérée Nord.

5° La **zone australe** ou *calotte australe* s'étend du cercle polaire austral au pôle Sud de la Terre.

$$- 90^{\circ} < \varphi < - 66^{\circ} 33'.$$

Le Soleil y est circumpolaire pendant une partie de l'année.

EXERCICES

35. — Un bâton vertical dépasse le sol horizontal de 1,5 m. Quand la longueur de son ombre est minimum, on la mesure et on trouve 1,5 m au nord du bâton. Quelle est la hauteur du Soleil au-dessus de l'horizon? Le jour où l'on fait cette mesure, la déclinaison du Soleil est $18^{\circ} 30'$. Calculer la latitude du lieu où le bâton est planté.

Mêmes questions si, toutes les autres données étant inchangées, la longueur de l'ombre est 0,5 m.

36. — Lorsque la déclinaison du Soleil est $+ 12^{\circ}$, quelle est la latitude du parallèle qui limite la zone où le Soleil est circumpolaire? qui limite la zone où le Soleil n'apparaît pas?

37. — On lit sur l'*Annuaire du bureau des longitudes* :

22 mars 1951. Soleil : $\alpha = 0 \text{ h } 4 \text{ m}$; $\delta = 0^{\circ} 25'$.

Peut-on en déduire l'angle du plan de l'écliptique et du plan de l'équateur? Faire le calcul et conclure.

38. — Sur la figure 70, l'angle SOA est la longitude L du Soleil. Établir la relation :

$$\operatorname{tg} \alpha = \operatorname{tg} L \cos \varepsilon.$$

Dans quels cas a-t-on :

$$\alpha = L?$$

INÉGALITÉ DES JOURS ET DES NUITS

■ 62. **La Terre, éclairée par le Soleil.** — Nous admettons provisoirement que le Soleil est suffisamment éloigné pour que les rayons lumineux qui atteignent la Terre, et l'éclairent, soient sensiblement parallèles. Dans ces conditions, ces rayons forment un cylindre circonscrit à la Terre, l'axe de ce cylindre étant la ligne qui joint le centre de la Terre au centre du Soleil. L'angle de cet axe et de l'équateur terrestre est la déclinaison δ du Soleil.

Le cercle de contact du cylindre et de la Terre, pour une valeur donnée de δ , est le **cercle d'illumination**. Il sépare, à un moment donné, la partie éclairée de la Terre, où il fait *jour*, et la partie où il fait *nuit*.

Soit M un point de la Terre. Pendant la rotation de la Terre sur elle-même, le point M décrit un parallèle, autour de la ligne des pôles. Lorsque le point M passe en L, sur le cercle d'illumination, le Soleil est dans le plan de l'horizon du point L; il se lève. Lorsque M décrit l'arc LA, le Soleil s'élève au-dessus de l'horizon, pour culminer en A. Il s'abaisse ensuite quand M décrit l'arc AC, et se couche quand M est en C. Le point M a ainsi décrit l'*arc de jour*, LAC. Il décrit ensuite l'*arc de nuit*, CBL.



The diagram shows a cross-section of the Earth as a sphere. A vertical line represents the axis of rotation, with the North Pole at the top and the South Pole at the bottom. A dashed horizontal line represents the equator. A solid horizontal line represents the horizon. A point M is marked on the surface. A red arc LAC represents the day arc, starting from point L on the horizon, going up to point A (culmination), and then down to point C. A black arc CBL represents the night arc, starting from point C, going down to point B, and then up to point L. The area between the horizon and the arc LAC is shaded, representing the illuminated part of the Earth. The area between the horizon and the arc CBL is unshaded, representing the dark part of the Earth. A line labeled S represents the Sun's rays, coming from the right and hitting the Earth's surface.

La rotation de la Terre étant sensiblement uniforme, la durée du jour et de la nuit sont proportionnelles aux longueurs respectives des arcs de jour et de nuit.

On voit, sur la figure 72, que les longueurs de ces arcs dépendent de la latitude du point M et de la déclinaison du Soleil.

Nous allons faire une étude géométrique de la question; nous la reprendrons ensuite par le calcul.

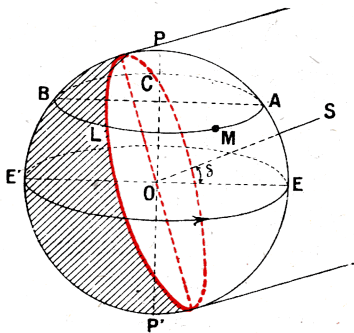


Fig. 72.

■ 63. Répartition des jours et des nuits. — 1^o Partons de l'équinoxe de printemps (fig. 73). La déclinaison est nulle; le Soleil est dans le plan de l'équateur; le cercle d'illumination

passé par les pôles. Donc sur toute la Terre, la nuit et le jour ont des durées égales.

De là vient le mot *équinoxe*, qui veut dire que la durée de la nuit égale celle du jour.

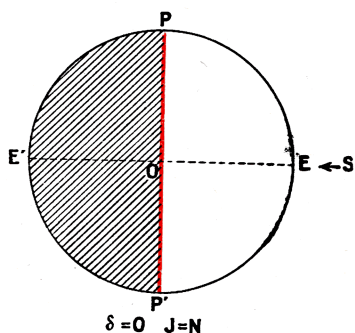


Fig. 73. — Équinoxe de printemps.

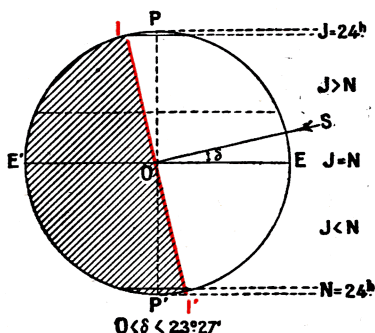


Fig. 74. — Printemps et été.

2° *Entre l'équinoxe de printemps et le solstice d'été*, δ croît de 0 à $+23^{\circ}27'$ (fig. 74). Dans l'hémisphère nord, le jour est plus long que la nuit; le jour croît avec δ , la nuit diminue. Au nord du parallèle de latitude $(90^{\circ} - \delta)$ N, le jour est permanent; le Soleil ne se couche pas.

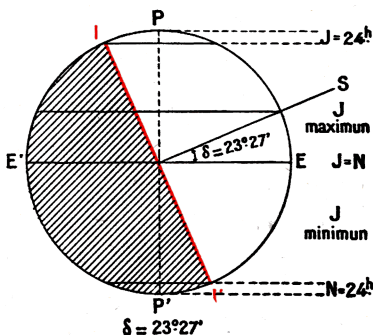


Fig. 75. — Solstice d'été.

Dans l'hémisphère sud, le jour est plus court que la nuit; il décroît quand δ croît; au sud du parallèle de latitude $(90^{\circ} - \delta)$ S, la nuit est permanente.

3° *Au solstice d'été*, $\delta = 23^{\circ}27'$ (fig. 75); le jour atteint son maximum dans l'hémisphère nord, son minimum dans l'hémisphère sud.

Il est permanent dans toute la calotte boréale ($\varphi > 66^{\circ}33'$) N; c'est la nuit qui est permanente dans la calotte australe.

4° *Du solstice d'été à l'équinoxe d'automne*, δ décroît de $23^{\circ}27'$ à 0. Nous pouvons utiliser encore la figure 74; le jour est plus long que la nuit dans l'hémisphère nord, plus court dans l'hémisphère sud. Mais δ diminuant, les jours diminuent dans l'hémisphère nord; ils allongent dans l'hémisphère sud.

5° A l'équinoxe d'automne, $\delta = 0$. Nous retrouvons les conditions de la figure 73 : égalité du jour et de la nuit sur toute la Terre.

6° De l'équinoxe d'automne au solstice d'hiver, δ décroît de 0 à $-23^{\circ}27'$. Dans l'hémisphère nord, le jour est plus court que la nuit, et décroît (fig. 76); au nord du parallèle de latitude $(90^{\circ} + \delta)$ N, la nuit est permanente.

Dans l'hémisphère sud, le jour est plus long que la nuit, et croît; au sud du parallèle de latitude $(90^{\circ} - \delta)$ S, le jour est permanent.

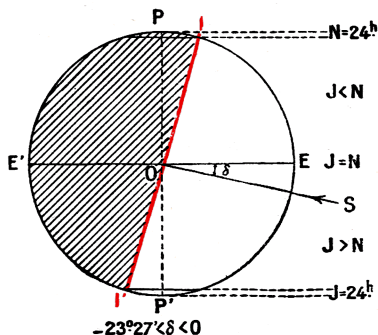


Fig. 76. — Automne et hiver.

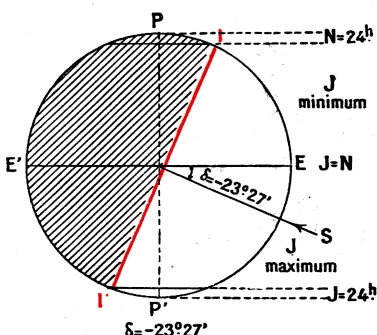


Fig. 77. — Solstice d'hiver.

7° Au solstice d'hiver, $\delta = -23^{\circ}27'$. La durée du jour atteint son minimum dans l'hémisphère nord, son maximum dans l'hémisphère sud. La nuit est permanente pour toute la calotte boréale; le jour est permanent pour toute la calotte australe (fig. 77).

8° Du solstice d'hiver à l'équinoxe de printemps, δ croît de $-23^{\circ}27'$ à 0. Nous pouvons encore utiliser la figure 76. Mais le jour croît dans l'hémisphère nord, tout en restant plus court que la nuit; il décroît dans l'hémisphère austral, tout en restant plus long que la nuit.

● REMARQUE. — Pour toute l'année, il y a égalité du jour et de la nuit à l'équateur.

■ 64. Calcul de la durée du jour. — Il s'agit de calculer la durée du jour (ou de la nuit) en un point de latitude ϕ , un jour où la déclinaison du Soleil est δ . Nous pourrions faire le même calcul que pour la durée de visibilité d'une étoile (n° 21). Mais nous préférons utiliser la représentation du phénomène sur la Terre, en prenant pour plan de figure le plan déterminé par l'axe PP' des pôles et par la direction OS du Soleil.

Soit AB le diamètre du parallèle de latitude φ ; le centre de ce parallèle est ω , sur la ligne des pôles PP'.

Le cercle d'illumination coupe ce parallèle en L et C. Nous avons figuré les diamètres EE' de l'équateur et II' du cercle d'illumination dans le plan AOB. II' coupe AB en H. Les points L et C se projettent en H sur le plan de la figure.

Rabattons le demi-cercle de diamètre AB sur le plan de figure; le point L du rabattement sépare le demi-arc de nuit AL et le demi-arc de jour LB. Dans le triangle rectangle H ω L, on a :

$$\cos \widehat{A\omega L} = \frac{\omega H}{\omega L}.$$

Dans le triangle rectangle H ω O, l'angle HO ω est égal à δ , déclinaison du Soleil.

D'où :

$$\omega H = O\omega \operatorname{tg} \delta.$$

ωL est le rayon du parallèle; il est égal à ωB et, dans le triangle rectangle O ω B, on a :

$$\widehat{\omega BO} = \widehat{BOE'} = \varphi$$

d'où :

$$\omega L = \omega B = O\omega \cotg \varphi.$$

On en déduit :

$$\cos \widehat{A\omega L} = \frac{\operatorname{tg} \delta}{\cotg \varphi} = \operatorname{tg} \delta \operatorname{tg} \varphi.$$

Le demi-angle de jour, $\widehat{L\omega B}$, est le supplément de $\widehat{A\omega L}$. On a donc, en appelant cet angle $\frac{\mathcal{J}}{2}$:

$$\cos \frac{\mathcal{J}}{2} = - \operatorname{tg} \delta \operatorname{tg} \varphi.$$

Cette formule a été établie en considérant une déclinaison positive et un point de latitude nord inférieure à $90^\circ - \delta$.

δ et φ sont positifs; $\frac{1}{2}\mathcal{J}$ est obtus; le jour est plus long que la nuit.

Si δ est négatif et φ positif, $\frac{1}{2}\mathcal{J}$ est aigu; la formule convient.

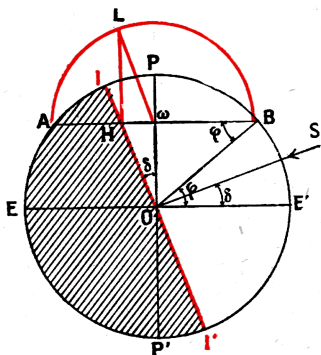


Fig. 78.

Si δ et φ sont négatifs, $\frac{1}{2}J$ est obtus; le jour est plus long que la nuit. La formule convient encore.

Elle n'est applicable que si :

$$-1 < \operatorname{tg} \delta \operatorname{tg} \varphi < +1.$$

Supposons δ positif; nous savons que c'est un angle aigu. Donc on doit avoir :

$$\begin{aligned} & -\operatorname{cotg} \delta < \operatorname{tg} \varphi < \operatorname{cotg} \delta \\ \text{ou :} \quad & \operatorname{tg} (\delta - 90^\circ) < \operatorname{tg} \varphi < \operatorname{tg} (90^\circ - \delta) \end{aligned}$$

et comme les tangentes sont dans le même ordre que les arcs, entre -90° et $+90^\circ$:

$$\delta - 90^\circ < \varphi < 90^\circ - \delta.$$

de sorte que le parallèle considéré doit être choisi entre les parallèles de latitudes $-(90^\circ - \delta)$ et $+(90^\circ - \delta)$ pour qu'il y ait lieu de calculer la durée du jour.

Si $\delta < 0$, le même calcul conduit à la conclusion :

$$-90^\circ - \delta < \varphi < 90^\circ + \delta$$

EXEMPLE. — *Calcul de la durée du jour, à Paris, au solstice d'hiver.*

$$\varphi = 48^\circ 50'; \quad \delta = -23^\circ 27'.$$

On aura :

$$\begin{aligned} \cos \frac{J}{2} &= -\operatorname{tg} 48^\circ 50' \cdot \operatorname{tg} (-23^\circ 27') \\ &= \operatorname{tg} 48^\circ 50' \cdot \operatorname{tg} 23^\circ 27' \\ \log \operatorname{tg} 48^\circ 50' &= 0,05829 \\ \log \operatorname{tg} 23^\circ 27' &= \underline{1,63726} \\ \log \cos \frac{J}{2} &= \underline{1,69555}. \\ \frac{J}{2} &= 60^\circ 15' \quad \text{pour} \quad 567 \quad D = 22. \\ & \quad 30'' \quad \quad \quad - 11 \\ & \quad 3'' \quad \quad \quad - 1 \\ \frac{J}{2} &= 60^\circ 15' 33''. \end{aligned}$$

Cet arc est parcouru en :

$$1 \text{ h} \times \frac{60^\circ 15' 33''}{15} = 4 \text{ h } 1 \text{ mn } 2 \text{ s}$$

ce qui met le lever du Soleil à : 7 h 58 mn 58 s

et le coucher à : 16 h 1 mn 2 s

en comptant à 12 h le passage au méridien.

Le calcul ci-dessus devrait subir plusieurs corrections.

1° La déclinaison du Soleil varie au cours de la journée. Dans l'exemple traité, cette correction serait nulle, car c'est au solstice que la variation de δ est la plus lente.

Mais la déclinaison est relative au centre du Soleil et le jour se

trouve prolongé du temps que met la moitié du disque pour disparaître au-dessous de l'horizon.

2° Ce n'est pas de 360° que la Terre a tourné entre deux passages du Soleil au méridien, mais de 361° , puisque le jour solaire dépasse en moyenne de 4 minutes la durée du jour sidéral.

3° La réfraction atmosphérique allonge encore le jour de 4 minutes environ, matin et soir, à la latitude de Paris.

Ainsi, à la date choisie dans le calcul précédent, la demi-durée du jour, à Paris, donnée par l'Annuaire, est égale à 4 h 6 mn.

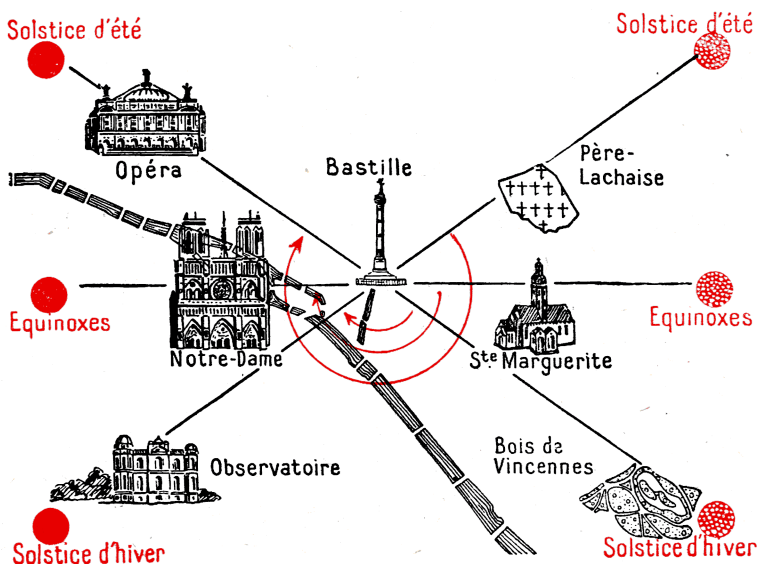


Fig. 79. — Le lever et le coucher du Soleil, vus de la Colonne de la Bastille, à Paris, aux solstices et aux équinoxes.

■ **65. Crépuscules.** — Le passage du jour à la nuit n'est pas brusque. Quand le Soleil est au-dessous de l'horizon, mais assez près encore, les rayons lumineux qu'il émet peuvent être réfléchis et diffusés par l'atmosphère terrestre, et la nuit n'est pas complète. C'est la cause du crépuscule qui se produit le matin avant le lever du Soleil et le soir après son coucher.

1° Le **crépuscule civil** dure tant que le Soleil n'a pas atteint une hauteur de 6° au-dessous de l'horizon.

Il varie, à Paris, de 33 minutes aux environs des équinoxes, à 43 minutes aux environs des solstices.

C'est le crépuscule civil qui détermine l'heure où les contraventions deviennent possibles pour les véhicules non éclairés.

2° Le **crépuscule astronomique** dure tant que le Soleil n'a pas atteint une hauteur de 18° au-dessous de l'horizon. La nuit n'est complète qu'à la fin du crépuscule astronomique, après le coucher du Soleil.

Le tableau ci-dessous montre la variation de ce crépuscule à la latitude de 45° et à l'équateur.

LATITUDES	DURÉE DU CRÉPUSCULE AU :			
	21 mars	21 juin	21 sept.	21 déc.
45°	1 h 41 mn ↗	2 h 35 mn ↘	1 h 41 mn ↗	1 h 49 mn
0°	1 h 10 mn ↗	1 h 16 mn ↘	1 h 10 mn ↗	1 h 16 mn

Près du pôle Nord, quand le Soleil reste constamment au-dessous de l'horizon, la nuit n'est complète que si la déclinaison du Soleil est inférieure à -18° , ce qui n'a lieu qu'entre le 14 novembre et le 30 janvier. La nuit polaire véritable n'a lieu qu'entre ces deux dates; elle est sensiblement plus courte que la nuit théorique de 6 mois.

Nous avons vu qu'au solstice d'été, le Soleil ne descend pas au-dessous de l'horizon à la latitude de $66^\circ 33'$. Si l'on diminue cette latitude de 18° , on trouve $48^\circ 33'$; à cette latitude, le crépuscule du soir rejoint celui du matin, à la même époque. Ainsi, à Paris ($\varphi = 48^\circ 50'$) la nuit n'est pas complète du 13 au 29 juin.

Pendant la durée du crépuscule, les étoiles de première grandeur sont visibles. C'est ce qui permet d'observer la position du Soleil parmi les constellations du zodiaque.

3° Le **crépuscule nautique** dure tant que le Soleil n'a pas atteint une hauteur de 12° au-dessous de l'horizon.

C'est la durée de ce crépuscule qui fixe les heures d'éclairage extérieur des navires et des côtes.



Fig. 80. — Le Soleil de minuit.

3

TRAJECTOIRE APPARENTE DU SOLEIL. ORBITE TERRESTRE

■ **66. Diamètre apparent du Soleil.** — Le disque solaire, que l'on peut observer directement, est circulaire. En réalité, le Soleil est une sphère dont on peut observer le mouvement de rotation sur elle-même (n° 73).

Si, d'un point T de la Terre, on vise deux points du Soleil où les tangentes au disque sont horizontales, on peut mesurer la différence des hauteurs des bords inférieur et supérieur, c'est-à-dire l'angle $ATB = D$. Cet angle est dit le **diamètre apparent** du Soleil. Il est aussi égal à la différence des ascensions droites (exprimées en degrés) des deux bords extrêmes à leur passage au méridien (fig. 81).

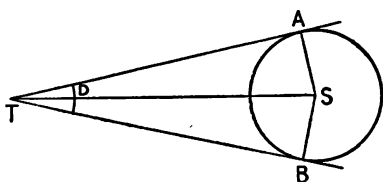


Fig. 81.

Le diamètre apparent du Soleil est variable. Il est maximum au 1^{er} janvier, et a pour valeur $32'35''$. Il est minimum au 1^{er} juillet, et vaut alors $31'31''$. Il croît alors de nouveau jusqu'à son maximum.

Cette variation est donc liée au déplacement annuel du Soleil. On en conclut qu'au cours de ce déplacement, **la distance de la Terre au Soleil est variable.**

On a, en effet :

$$TS = \frac{AS}{\sin \frac{D}{2}}.$$

Posons $AS = \rho$, rayon du Soleil. L'angle $\frac{D}{2}$ étant petit, ($16'$ environ), on peut confondre son sinus avec sa mesure en radian. On a alors :

$$TS = \frac{2\rho}{D} \quad (D \text{ en radian}) \quad (1)$$

ce qui montre :

→ La distance de la Terre au Soleil est inversement proportionnelle au diamètre apparent du Soleil.

■ **67. Trajectoire apparente du Soleil.** — Si l'on repère, à plusieurs époques de l'année, la direction du Soleil dans le plan de l'écliptique, on pourra, par la mesure du diamètre apparent

à chacune de ces époques, marquer sur cette direction une longueur qui sera, en prenant pour ρ une valeur arbitraire, l'image de la distance de la Terre au Soleil. Les extrémités des rayons vecteurs ainsi dessinés donnent une courbe semblable à la trajectoire apparente du Soleil.

Les faibles variations du diamètre apparent donneront d'ailleurs une précision bien insuffisante pour obtenir un tracé correct; c'est par la détermination des vitesses angulaires du Soleil que l'on peut utilement étudier la variation du rayon vecteur qui représente la distance considérée.

On a conclu (voir chap. v) que :

→ la trajectoire apparente du Soleil, dans le plan de l'écliptique, est une ellipse dont la Terre occupe un foyer.

Cette ellipse a une excentricité très faible, voisine de $\frac{1}{60}$.

La figure 82 représente cette ellipse, en exagérant son aplatissement. Le point P correspond au 1^{er} janvier, où D est maximum : c'est le **périgée**, à l'une des extrémités du grand axe de l'ellipse. L'autre extrémité A de cet axe, correspond au 1^{er} juillet (D minimum); c'est l'**apogée**. Le grand axe PA est dit : **ligne des apsides**.

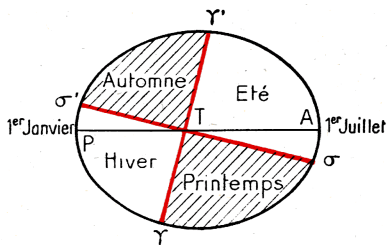


Fig. 82.

La ligne des solstices, $\sigma\sigma'$, fait avec la ligne des apsides un angle d'environ 12° ; la ligne $\gamma\gamma'$ des équinoxes est perpendiculaire à la ligne des solstices.

● REMARQUE. — Il ne faut pas s'étonner de voir le Soleil plus près de la Terre en janvier qu'en juillet, alors que, dans notre hémisphère, on aurait pu penser au résultat contraire. L'obliquité des rayons solaires en janvier est bien plus grande qu'en juillet et la durée de l'éclairement est moins longue : ceci explique que la quantité de chaleur reçue du Soleil en un point de nos régions soit inférieure en janvier qu'en juillet.

■ 68. **Inégalités des saisons.** — Les moments qui correspondent aux solstices et aux équinoxes peuvent être exactement déterminés. Les durées des saisons s'en déduisent. On trouve :

Printemps	: 92 j 20 h
Été	: 93 j 15 h
Automne	: 89 j 19 h
Hiver	: 89 j.

Le Soleil reste donc environ 8 jours de plus dans l'hémisphère boréal que dans l'hémisphère austral.

Ces durées sont proportionnelles aux aires des secteurs découpés, dans l'ellipse, par les lignes $\sigma\sigma'$ et $\gamma\gamma'$. Plus généralement, nous verrons (chap. v) que *les aires balayées par le rayon vecteur qui joint la Terre au Soleil sont proportionnelles aux temps mis à les balayer*. On dit que l'ellipse considérée est décrite suivant la loi des *aires*.

■ 69. Distance de la Terre au Soleil. — 1^o *Parallaxe solaire*. — Soit A un point de la Terre, AH l'horizon en ce point.

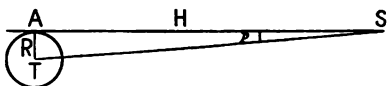


Fig. 83.

Si S indique la position du centre du Soleil quand ce centre est à l'horizon, on appelle *parallaxe horizontale* du Soleil l'angle $AST = p$.

Cet angle est très petit. Il varie de $8'',65$ vers le 1^{er} juillet à $8'',95$ vers le 1^{er} Janvier. Nous verrons plus loin (chap. v, n^o 135) comment on le détermine.

Le plus grand rayon terrestre est le rayon équatorial. Les nombres que nous avons donnés s'appliquent à la *parallaxe horizontale équatoriale*.

2^o *Distance de la Terre au Soleil*. — La connaissance de p entraîne celle de la distance ST. On a en effet :

$$ST = \frac{R}{\sin p}$$

ou, en remplaçant le sinus par l'arc en radian :

$$(2) \quad ST = \frac{R}{\frac{\pi p}{180 \times 60 \times 60}} = \frac{648\,000\,R}{\pi p} \quad (p \text{ en secondes}).$$

On trouve alors les résultats suivants :

Pour $p = 8'',65$: $ST = 23\,831\,R$.

Pour $p = 8'',95$: $ST = 23\,048\,R$.

Le demi grand axe de l'orbite est donc égal à la demi-somme de ces nombres, soit $23\,439,5\,R$. Soit environ 150 millions de kilomètres.

La lumière parcourt, en une seconde, 300 000 kilomètres. Elle met donc, pour nous parvenir du Soleil :

$$\frac{150 \times 10^6}{3 \times 10^5} = 500 \text{ secondes}$$

soit 8 m 20 s.

3^o Unité astronomique de longueur. — Pour des raisons que nous ne pouvons exposer ici, on a choisi pour *unité astronomique de longueur* (UA) la distance :

$$1 \text{ UA} = 23\,400 \text{ R} = 149\,504.10^3 \text{ km.}$$

R est le rayon équatorial de la Terre.

Cette unité est voisine de la longueur du demi grand axe de l'orbite solaire.

4^o Rayon du Soleil. — Reprenons la formule (1)

$$TS = \frac{2\rho}{D}$$

(D diamètre apparent du Soleil, en radian.)

Nous pouvons, connaissant TS et D, en déduire ρ , rayon du Soleil. Prenons la plus grande distance et, par suite, le plus petit diamètre apparent.

$$TS = 23\,831 \text{ R} \quad \text{avec} \quad D = 31' 31'' = 1\,891''$$

On en déduit :

$$\rho = \frac{23\,831 \text{ R} \times 1\,891 \times \pi}{2 \times 180 \times 60 \times 60}.$$

On trouve :

$$\rho = 109 \text{ R.} \quad (\text{environ } 700\,000 \text{ km}).$$

D'où :

$$\frac{\text{Volume du Soleil}}{\text{volume de la Terre}} = 109^3$$

ou, en chiffres ronds :

$$V. \text{ du Soleil} = 1\,300\,000 \text{ v. de la Terre.}$$

■ **70. Orbite de la Terre.** — Nous en sommes encore à l'hypothèse de la Terre tournant sur elle-même, dans le sens direct, au centre de la sphère céleste (mouvement diurne). Le Soleil semble tourner autour de la Terre en un an.

Mais, si les dimensions de l'orbite sont suffisamment petites par rapport à la distance des étoiles, le déplacement apparent du Soleil sur la sphère céleste pourrait s'expliquer aussi bien si l'on disait : c'est le Soleil qui est fixe; la Terre décrit en un an, dans le plan de l'écliptique, une ellipse dont le Soleil occupe un foyer.

Les figures 84 et 85 montrent le déplacement apparent du Soleil *s* sur le zodiaque, aussi bien si *S* tourne autour de *T* (fig. 84) ou si *T* tourne autour de *S* (fig. 85), le mouvement se faisant dans le même sens dans les deux cas. La variation du diamètre apparent du Soleil s'explique également dans l'un et l'autre cas.

Un astronome grec, ARISTARQUE (— 280 environ), avait émis

l'hypothèse du déplacement de la Terre autour du Soleil, Il fut combattu par ses contemporains; ARCHIMÈDE, en particulier, ne pouvait accepter que toute l'orbite terrestre puisse être assimilée à un point par rapport à la sphère céleste.

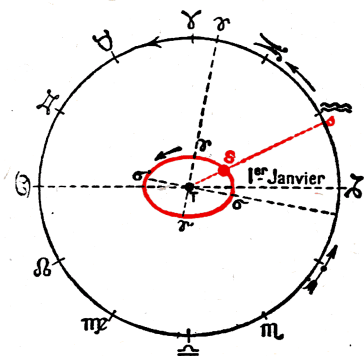


Fig. 84.

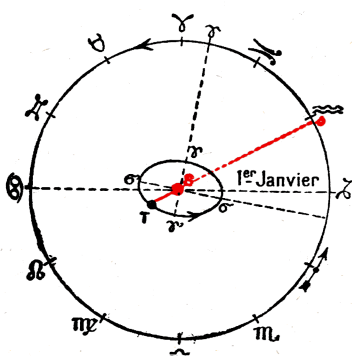


Fig. 85.

17 siècles après Aristarque, on a donc conservé la Terre fixe et le Soleil tournant autour d'elle. Ce n'est qu'en 1531 que COPERNIC place le Soleil au centre de la sphère des fixes, et fait tourner à la fois la Terre sur elle-même en un jour et autour du Soleil en un an. Nous reviendrons sur cette découverte fondamentale à propos des planètes.

A l'époque de Copernic, aucune mesure ne pouvait donner l'argument irréfutable qui permet de choisir entre les deux hypothèses. La découverte faite par BRADLEY¹, en 1726, de l'**aberration** des étoiles, devait donner la preuve décisive du déplacement de la Terre autour du Soleil.

■ **71. Aberration des étoiles.** — Bradley avait observé que les étoiles semblent décrire, *en une année*, de petites courbes ovales dont le grand axe mesure toujours 41". La période de ce déplacement le liait évidemment au mouvement annuel de la Terre.

Si la Terre est fixe et le Soleil mobile, ce phénomène est inexplicable. Mais l'explication est simple, si c'est la Terre qui parcourt son orbite.

En supposant, pour simplifier le calcul, l'orbite circulaire et de 15.10^7 km de rayon, on trouve que la vitesse de la Terre, est de 30 km par seconde.

RÖMER² avait d'autre part, en 1676, pu déterminer la vitesse de la lumière (300 000 km par seconde).

1. BRADLEY (1692-1762). Astronome anglais.

2. RÖMER (1644-1710). Astronome danois. C'est à l'observatoire de Paris qu'il détermina la vitesse de la lumière.

Une lunette AB, d'oculaire A, d'objectif B, de longueur L (fig. 86), étant pointée sur une étoile, la lumière que l'œil reçoit en A a atteint l'objectif B un court instant ε avant d'atteindre A. Si V est la vitesse de la lumière, on a :

$$L = \varepsilon V.$$

Pendant ce temps, l'objectif s'est déplacé d'une longueur égale à εv (v étant la vitesse de la Terre sur son orbite). Au moment où la lumière l'atteignait, B occupait donc la position B', telle que :

$$B'B = \varepsilon v.$$

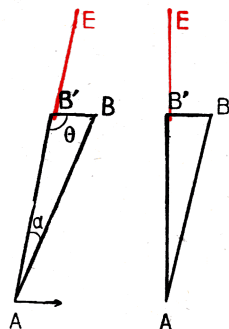


Fig. 86.

Fig. 87.

La vraie direction de l'étoile est donc celle de AB', faisant avec AB un angle α . Soit θ l'angle AB'B. On aura (triangle ABB') :

$$\frac{\sin \alpha}{B'B} = \frac{\sin \theta}{AB}, \quad \text{ou :} \quad \frac{\sin \alpha}{\varepsilon v} = \frac{\sin \theta}{\varepsilon V}$$

d'où : $\sin \alpha = \frac{v}{V} \sin \theta$, avec $\frac{v}{V} \approx \frac{1}{10\,000}$.

α est maximum si $\theta = 1D$. On a alors (fig. 87) :

$$\sin \alpha \approx \frac{1}{10\,000}.$$

Un calcul précis donne : $\alpha = 20'',47$.

Pour une direction d'étoile quelconque, il y a deux positions T_1 et T_2 de la Terre, sur son orbite, où le vecteur vitesse est perpendiculaire à cette direction; T_1 et T_2 sont diamétralement opposés et v_1 et v_2 sont en sens contraires (fig. 88). Entre les directions apparentes correspondantes de l'étoile, il y aura donc un angle de :

$$20'',47 \times 2 \approx 41''.$$

Si la direction TE est perpendiculaire au plan de l'écliptique, l'angle (Tv , TE) est toujours droit et l'étoile semblera décrire un cercle sur un cône de $41''$ d'angle générateur. C'est le cas des étoiles situées près des pôles de l'écliptique.

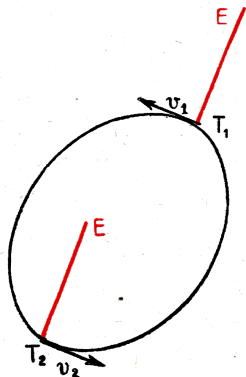


Fig. 88.

Si l'étoile est dans le plan de l'écliptique, son déplacement apparent se fait dans ce plan, et l'étoile semble décrire un segment de droite, que nous voyons sous un angle de $41''$.

Pour toutes les positions intermédiaires, elle décrit un ovale dont le grand axe, parallèle au plan de l'écliptique, est vu sous l'angle constant de $41''$.

Cette découverte confirme de façon magistrale le déplacement annuel de la Terre.

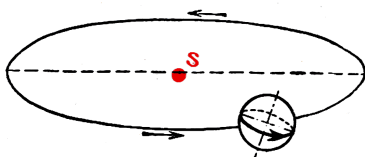


Fig. 89.

Nous devons donc nous représenter maintenant la Terre comme animée d'un double mouvement (fig. 89) :

1° **rotation** autour de son axe, en un jour sidéral. Cet axe

fait un angle de $23^{\circ} 27'$ avec le plan de l'écliptique;

2° **révolution annuelle** autour du Soleil.

Ces deux mouvements sont de même sens, pour un observateur orienté suivant l'axe de la Terre.

■ **72. Précession des équinoxes.** — Si, une année déterminée, l'équateur coupe l'écliptique au point γ , à l'équinoxe de printemps, l'année suivante on trouve que ce point d'intersection des deux courbes s'est déplacé de $50''$ environ, dans le sens rétrograde. L'équinoxe se produit donc *en avance*, avant que la longitude du Soleil ait augmenté de 360° . D'où le nom de **précession des équinoxes**.

Il en résulte que le point γ fait le tour de l'écliptique en un peu moins de 26 000 ans.

Ainsi, des inscriptions chaldéennes (— 3 000 ans) plaçaient l'équinoxe de printemps dans la constellation du *Taureau*; HIPPARQUE (— 128) le plaçait à l'entrée de celle du *Bélier*; il est maintenant dans celle des *Poissons*. C'est Hipparque qui a mis en évidence la rétrogradation du point γ (fig. 90).

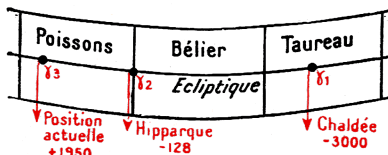


Fig. 90. — Déplacement de l'équinoxe.

Or, par rapport au zodiaque, l'écliptique reste un plan fixe. C'est donc l'équateur qui se déplace, ou, ce qui revient au même, l'axe de rotation de la terre.

Cet axe décrit en 26 000 ans, autour d'une perpendiculaire au plan de l'écliptique, un cône dont le demi-angle au sommet est $23^{\circ} 27'$.

C'est le mouvement d'une toupie. Il est dû à l'action du Soleil

(et aussi de la Lune et des Planètes), sur le renflement équatorial de la Terre.

Les conséquences de ce phénomène sont les suivantes :

1° Les pôles de la Terre sont fixes sur la Terre; *mais les pôles célestes se déplacent*, chacun d'eux décrivant en 26 000 ans un cercle autour d'un pôle de l'écliptique.

Nous avons tracé ce cercle (fig. 91); l'étoile polaire est actuellement à 1 degré du pôle; elle s'en rapprochera encore jusqu'en 2100, puis s'en éloignera. Dans 2 000 ans, ce sera l'étoile γ de Céphée qui sera voisine du pôle boréal; dans 12 000 ans, Véga ne sera qu'à 4 degrés du pôle. Il y a 4 500 ans, c'est l'étoile α du Dragon qui était l'étoile polaire.

Mais les pôles terrestres n'ont pas changé, et les monuments que l'on sait avoir été orientés Nord-Sud par les Égyptiens conservent encore cette orientation (Pyramide de Chéops). Les latitudes terrestres sont pratiquement invariables.

2° Les coordonnées équatoriales des étoiles ne sont pas constantes puisque l'origine γ des ascensions droites varie, et que l'équateur de la sphère céleste n'est pas fixe.

Ces coordonnées varient lentement, mais il est nécessaire, pour pouvoir les employer, de tenir à jour les tables qui les donnent.

EXEMPLE.

Étoile	1 ^{er} janvier 1915		1 ^{er} janvier 1951	
	α	δ	α	δ
Polaire	1 h 29 m 16 s	88°51' 6"	1 h 49 m 28 s	89° 2' 2"
Algol	3 h 2 m 38 s	40°37'44"	3 h 4 m 58 s	40° 46' 6"
Sirius	6 h 41 m 24 s	— 16°35'56"	6 h 42 m 59 s	— 16° 38'51"
Altair	19 h 46 m 35 s	8°38'35"	19 h 48 m 24 s	8° 44'15"

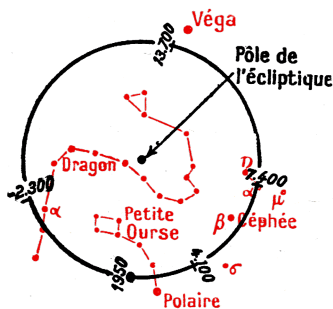
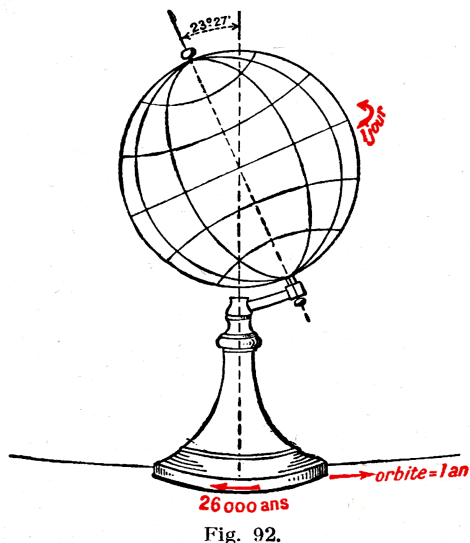


Fig. 91. — Le déplacement du pôle boréal sur la sphère des fixes.

3° Les *signes* du zodiaque, ou cases de 30° chacune et contenant au temps d'Hipparque les constellations du même nom,

étaient déterminés à partir du point γ , à l'entrée du signe du Bélier. On a conservé cette division, mais les constellations n'habitent plus la case qui porte leur nom. Actuellement, le décalage est de 30° environ, donc d'une case; ainsi la constellation du Bélier est dans le signe du Taureau, et ainsi de suite.



● REMARQUES. — I. Les globes terrestres sont habituellement montés de façon que l'axe de rotation du globe fasse un angle de $23^\circ 27'$ avec l'axe du support.

En plaçant le support sur une table horizontale, sur laquelle on aurait figuré l'orbite terrestre, on peut représenter les mouvements de la Terre que nous avons étudiés (fig. 92) :

1^o le globe tourne autour de son axe en 1 jour, (sens direct);

2^o le pied décrit l'orbite en un an (sens direct);

3^o le pied tourne sur lui-même, en 26 000 ans (sens rétrograde).

On réduira, naturellement les durées indiquées, en représentant, par exemple, un jour par une seconde.

II. Le mouvement de la Terre est influencé par l'action de la Lune dans sa rotation autour de la Terre, de sorte que le pôle céleste décrit une courbe sinueuse, de part et d'autre du cercle que nous avons dessiné figure 93. On appelle **nutation** ce mouvement dont la période est de 18,6 ans environ. L'amplitude de ce mouvement est de $18'',4$ seulement.

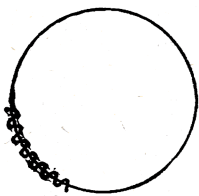


Fig. 93.

■ 73. Rotation du Soleil. — L'observation de taches à la surface du Soleil permet de mettre en évidence la rotation du Soleil sur lui-même. On voit apparaître une tache sur le bord oriental; elle traverse le disque en 13,5 j, disparaît sur le bord occidental, et réapparaît 13,5 j après sur le bord oriental. Il s'écoule 27,25

jours entre deux passages d'une même tache au méridien. La trajectoire des taches est inclinée sur le plan de l'écliptique, de sorte que l'axe du Soleil fait un angle de 83° avec ce plan.

La rotation du Soleil s'effectue dans le sens direct. On appelle **rotation synodique** du Soleil le temps qui sépare deux pas-

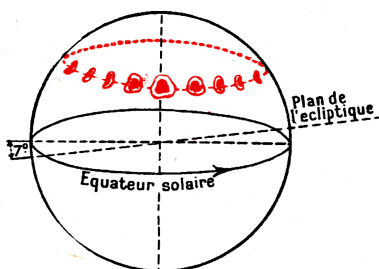


Fig. 94.

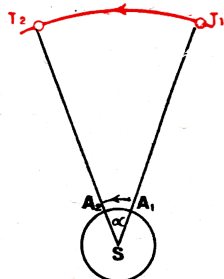


Fig. 95.

sages de la même tache au méridien central du Soleil. C'est la période observée de 27,25 jours.

Soit A_1 la position de la tache au début de cette période : la terre occupe la position T_1 . La tache fait le tour du Soleil et revient en A_2 , en face de la Terre qui, pendant ce temps s'est déplacée de T_1 à T_2 . Le Soleil a donc, en réalité, pendant une rotation synodique, tourné de $360^\circ + \alpha$, en posant $A_1A_2 = \alpha$.

On appelle **rotation sidérale** la durée d'une rotation de 360° .

Désignons, en jours, par s la rotation synodique, par σ la rotation sidérale. Le mouvement étant uniforme, on doit avoir :

$$\frac{360^\circ}{\sigma} = \frac{360^\circ + \alpha}{s} = \frac{360^\circ}{s} + \frac{\alpha}{s}.$$

Or, $\frac{\alpha}{s}$, c'est l'angle dont tourne la Terre en un jour. Si t est la durée de l'année, on a :

$$\frac{\alpha}{s} = \frac{360^\circ}{t}.$$

D'où :

$$\frac{360^\circ}{\sigma} = \frac{360^\circ}{s} + \frac{360^\circ}{t}$$

et :

$$\frac{1}{\sigma} = \frac{1}{s} + \frac{1}{t}.$$

Avec $s = 27,25$ et $t = 365,25$, on trouve : $\sigma = 25,4$ jours.

Mais cette durée varie suivant que les taches sont plus ou moins loin de l'équateur solaire, de 24 j 17 h à l'équateur à 29 j au pôle, ce qui démontre la fluidité de la surface du Soleil. Nous reviendrons sur cette question dans l'étude de la constitution physique du Soleil.

RÉSUMÉ

	Valeurs extrêmes	Moyenne
Diamètre apparent du Soleil . . .	31'31" à 32'35"	32'
Parallaxe du Soleil	8",65 à 8",95	8",8
Distance de la Terre au Soleil. . .	"23 831R à 23 048R	UA = 23 400R
Rayon du Soleil.	109 R	
Volume du Soleil	1 300 000 T	
Rotation du Soleil.	24 j 17 h à 29 j	25,4 jours
Inclinaison de l'écliptique sur l'équateur : 23°27'		
Rétrogradation de γ : 50" par an. — Période : 26 000 ans environ.		

◀ LECTURE ▶

■ **74. Variation des éléments de l'orbite terrestre.** — Une difficulté, en astronomie, est de trouver des repères fixes. Nous avons déjà vu que les coordonnées équatoriales des étoiles dites *fixes* sont des nombres qui varient, lentement il est vrai, mais de façon appréciable. Équateur et pôles célestes se déplacent sur la sphère céleste.

Nous avons ensuite considéré l'écliptique comme fixe, et déterminé un système de coordonnées écliptiques. Mais l'obliquité de l'écliptique elle-même varie; elle diminue de 47" par siècle, et ceci est la manifestation *actuelle* d'une variation *périodique* à très longue période; il s'y ajoute une autre variation qui la fait osciller de 9" autour de sa position moyenne en 18 ans environ; de sorte que l'obliquité peut varier de 24°59' à 24°36' environ. Le plan de l'écliptique et celui de l'équateur ne sont donc jamais confondus, mais les tropiques et les cercles polaires ne sont pas fixes sur la Terre.

Sur l'écliptique, nous avons vu se déplacer l'axe des équinoxes, donc l'axe des solstices qui lui est perpendiculaire. L'axe des apsides fait actuellement avec ce dernier un angle de 12° environ; nous en avons déduit l'inégalité des saisons.

Mais la longitude du *périgée* croît de 62" environ par an, de sorte que ce point se rapproche du point γ .

Au 1^{er} janvier 1900, la longitude du périgée était 281°13'15". Un calcul facile, à partir de cette donnée, montre que vers l'an 1250, la longitude du périgée était 270°; la ligne des apsides coïncidait avec celle des solstices. Le printemps et l'été étaient égaux; l'automne et l'hiver l'étaient également, mais moins longs que les deux autres saisons (fig. 96, I).

Vers l'année 3850, la longitude du périgée sera 315°. La disposition des points remarquables de l'orbite terrestre sera celle de la figure 96. II. L'été sera la plus longue saison, l'hiver sera la plus courte, le printemps et l'automne seront égaux.

Il serait facile de continuer et de voir ce qui se passera en l'an 6450, quand le périhélie sera confondu avec le point γ .

Ces anticipations peuvent sembler de pures spéculations; mais

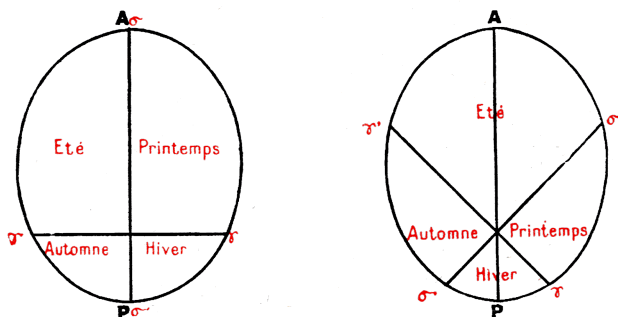


Fig. 96.

I. En 1250.

II. En 3850.

L'excentricité de l'orbite a été fortement exagérée.

les périodes que nous envisageons sont bien petites, à l'échelle astronomique des temps.

Enfin, la fixité même des pôles de la Terre n'est pas parfaite. Les déplacements de masses d'air dans l'atmosphère, de masses d'eau dans les Océans, font que l'axe de la Terre est soumis à de faibles variations, qui se traduisent par de légers changements dans les latitudes; mais ces changements sont périodiques et la courbe décrite par le pôle Nord, par exemple, resterait inscrite dans un carré de 40 mètres de côté. C'est pourquoi nous avons pu dire que les latitudes géographiques sont *pratiquement* invariables.

EXERCICES

39. — La déclinaison du Soleil étant δ , on demande :

a) la hauteur du Soleil à midi vrai en un point de latitude φ ;

b) les points de la Terre pour lesquels il ne se couche pas;

c) les points de la Terre qui le voient passer à leur zénith.

Applications : $\delta = 22^\circ 30'$; $\varphi = 48^\circ 50'$ (Paris)

$\delta = 23^\circ 27'$; $\varphi = 43^\circ 7'$ (Toulon).

40. — Trouver la latitude d'un lieu où la hauteur du Soleil, au jour de l'équinoxe, à midi vrai, est 30° .

41. — Étant donné la hauteur h d'une tour verticale, la latitude φ du lieu, la déclinaison δ du Soleil, trouver la longueur l de l'ombre de la tour, à midi vrai. (Réponse : $l = h |\operatorname{tg}(\delta - \varphi)|$).

Applications : $h = 20$ m; $\varphi = 36^\circ 46'$; $\delta = -16^\circ$

$h = 25$ m; $\varphi = -20^\circ$; $\delta = 18^\circ$.

42. — A Brest ($\varphi = 48^\circ 23'$), de combien a varié l'ombre méridienne d'une tige verticale de 2 m du 1^{er} au 20 juin, la déclinaison du Soleil étant passée de $22^\circ 5'$ à $23^\circ 27'$ de la première date à la seconde?

43. — Trouver la latitude d'un lieu où l'ombre d'une tour verticale, au solstice d'été, à midi vrai, a pour longueur la moitié de la hauteur de la tour.

4

MESURE
DU TEMPS

■ **75. Temps sidéral.** — Nous avons défini le *jour sidéral*, au début de ce cours, comme la durée de la rotation de la sphère céleste. Puis, le point γ ayant été choisi sur l'équateur, nous avons appelé jour sidéral la durée qui sépare deux passages successifs du point γ au méridien du lieu. L'heure sidérale en ce lieu, à un instant considéré, est l'angle horaire du point γ .

Or, le point γ n'est pas fixe. Le jour sidéral défini à l'aide de la sphère céleste n'est donc pas égal au jour sidéral défini à l'aide du point γ . Puisque le mouvement du point γ est rétrograde, le jour sidéral défini à l'aide du point γ est un peu plus court que la durée de la rotation de la sphère céleste. En 26 000 ans, la différence est d'un jour entier.

Une différence d'un jour en 26 000 ans représente environ 0,01 s par jour. Elle est insignifiante.

Nous dirons donc :

- Le **jour sidéral** est l'intervalle de temps qui sépare deux passages consécutifs du point γ au méridien du lieu.
- La durée de la rotation de la sphère céleste autour de l'axe du monde est plus longue d'un centième de seconde environ.
- Le **temps sidéral** se compte à partir du passage du point γ au méridien; il est égal à l'angle horaire du point γ .
- Les **horloges astronomiques** conservent le temps sidéral.

Entre le temps sidéral T , l'angle horaire H d'un astre et son ascension droite α , nous avons établi la relation :

$$T = H + \alpha$$

qui se réduit à :

$$T = \alpha$$

quand l'astre passe au méridien, c'est-à-dire quand H est nul.

● **REMARQUE.** — Les irrégularités du mouvement de la Terre, en particulier la nutation mais aussi d'autres causes qui ne sont pas toutes connues, font que le jour sidéral n'est pas rigoureusement constant. Sa variation peut atteindre un centième de seconde en plus ou en moins. Il constitue cependant une bonne unité de temps. Mais le temps sidéral ne convient pas pour les usages courants, notre vie étant réglée sur le Soleil et non pas sur les étoiles.

■ **76. Temps solaire vrai.** — On appelle **jour solaire vrai** en un lieu l'intervalle qui sépare deux culminations successives du centre du Soleil au méridien de ce lieu.

Le moment de la culmination est le **midi vrai** en ce lieu.

Pendant cet intervalle de temps, l'ascension droite du Soleil a augmenté de 1° environ; la Terre a donc tourné de 361° et par suite, le jour solaire vrai est plus long que le jour sidéral de 4 minutes environ.

● Le **temps solaire vrai** (t_s) est égal à l'angle horaire du Soleil. Il est donc compté à partir de midi.

Les hommes se sont servi du temps solaire vrai pendant des siècles, tant qu'un besoin de précision n'a pas été trop impérieux. C'est le temps indiqué par les *cadrons solaires*.

Mais le jour solaire vrai est une mauvaise unité de temps, car il n'est pas constant. Cela tient à ce que l'orbite de la Terre n'est pas circulaire, mais elliptique et que les arcs parcourus ne sont pas proportionnels aux temps : ce sont les aires balayées par le rayon vecteur Terre-Soleil qui ont cette propriété. Cela tient aussi à l'obliquité de l'orbite sur le plan de l'équateur. L'excès du jour solaire vrai sur le jour sidéral n'est donc pas constant; il varie de 3 m 36 s à 4 m 26 s. Une horloge réglée un jour sur le Soleil paraîtrait déréglée au bout de peu de temps.

■ **77. Temps solaire moyen.** — On a donc été conduit à rechercher une unité de temps qui soit constante, et qui ne s'écarte pas trop du jour solaire vrai.

Pendant longtemps, on a choisi la durée moyenne des jours solaires pendant une très longue période. Mais il fallait s'entendre sur le choix de cette période pour tenir compte des variations séculaires.

En 1955, pour des raisons de précision et d'universalité dans les calculs astronomiques, la conférence internationale de Dublin a décidé de donner une définition *a priori* du jour solaire moyen, qui servira d'**étalon de temps**. Cette définition rattache l'unité non plus à la rotation de la Terre mais à l'**année tropique**, temps nécessaire pour que la longitude moyenne du Soleil, comptée à partir d'un point γ mobile, augmente de 360° .

● Le **jour solaire moyen** est la fraction $\frac{1}{365,24\ 219\ 879}$ de l'année tropique pour 1900.

● Le **temps solaire moyen** (ou astronomique) est compté à partir de midi.

Le jour solaire moyen est divisé en 24 heures, l'heure en 60 minutes, la minute en 60 secondes. La seconde ainsi définie comme la fraction $\frac{1}{86\,400}$ du jour solaire moyen est celle qui est

employée dans tous les systèmes d'unités physiques : C. G. S., M. T. S, etc. Avec cette unité de temps, on ne peut plus dire que la culmination du centre du Soleil, en un lieu, coïncide avec le midi moyen; il y a une différence, en plus ou en moins, qui peut aller jusqu'à 16 minutes; la coïncidence des deux midis est réalisée 4 fois par an, en avril, en juin, en septembre et en décembre.

On ne peut pas déterminer le midi moyen par l'observation d'un astre car il n'existe pas d'astre dont la marche suive le temps moyen.

Mais la connaissance du mouvement de rotation et de translation de la Terre permet de *calculer*, pour chaque jour, la différence entre le midi moyen et le midi vrai en un lieu donné.

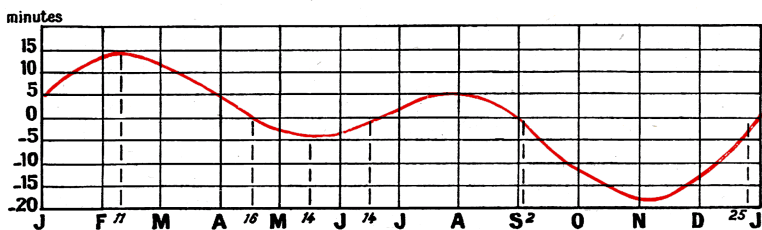


Fig. 97. — Équation du Temps.

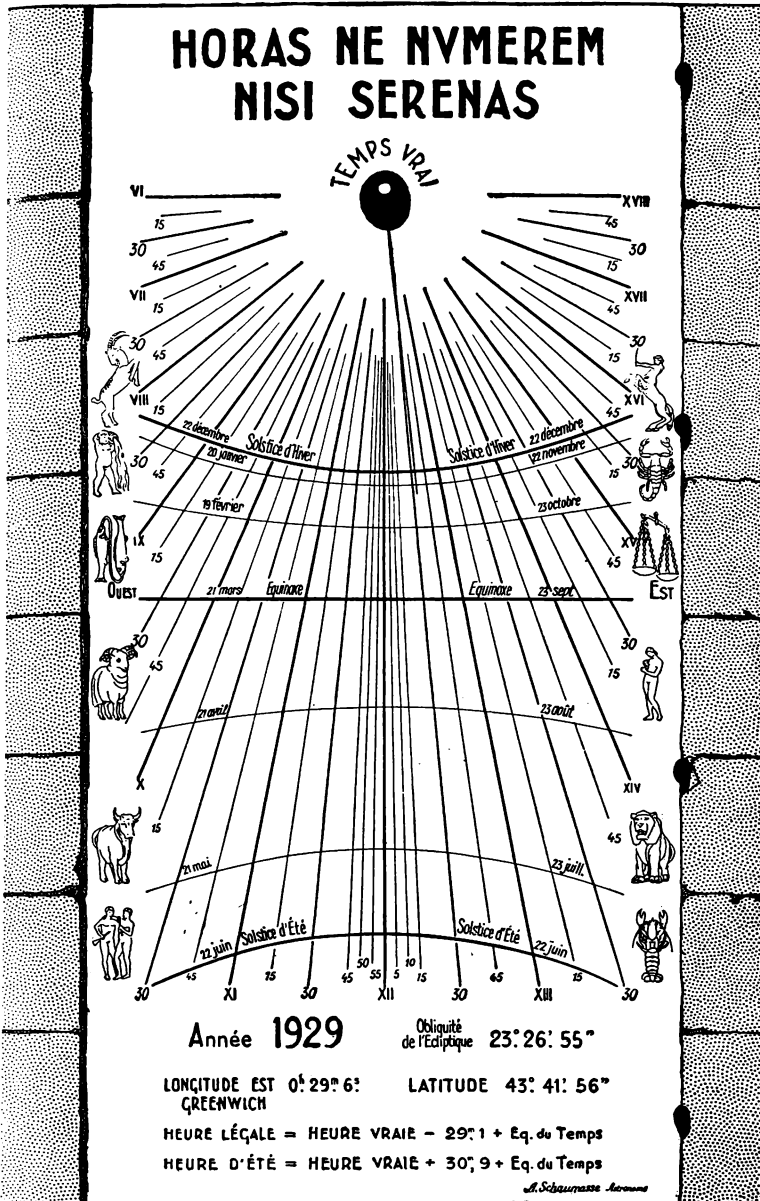
Cette différence traduit la valeur des inégalités séculaires ou périodiques du temps solaire vrai. On l'appelle l'**équation du temps**. Elle est figurée, au cours d'une année, par la courbe dessinée ci-dessus (fig. 97) les abscisses figurant les mois, les ordonnées les minutes. Elle varie peu d'une année à l'autre. Les annuaires publient les valeurs de l'équation du temps pour chaque jour de l'année, ce qui permet, en observant le passage du Soleil, d'en déduire le midi moyen en un lieu.

En appelant E la valeur algébrique de l'équation du temps, on aura donc :

$$\text{Temps moyen} = \text{Temps solaire vrai} + E.$$

Un cadran solaire (fig. 98), qui donne le temps solaire vrai du lieu, donnera donc aussi le temps moyen, si on lui adjoint une table des valeurs de E.

● REMARQUE. — On voit que l'étalon de temps a été précisé peu à peu, par suite de la nécessité d'avoir des résultats numériques



Sadi-Photo.

Fig. 98. — Cadran solaire du Lycée de Nice.

La légende peut être traduite par :
 « Je voudrais ne compter que des heures de bonheur ».

comparables. Il en fut de même pour l'étalon international de la mesure des longueurs. Il est utile de signaler que la précision des mesures de temps est du même ordre de grandeur que celle des mesures de longueur, soit 10^{-7} en valeur relative.

■ **78. Temps civil** • Le **temps civil** est égal au temps moyen augmenté de 12 heures. Il se compte donc à partir de minuit.

EXEMPLES. — 18 mai, 6 h, temps moyen = 18 mai, 18 h, temps civil.
14 août, 18 h, temps moyen = 15 août, 6 h, temps civil.

Le temps civil, défini à partir du temps solaire vrai, est, comme ce dernier, un temps *local*.

Quand il est midi vrai à Strasbourg (longitude $5^{\circ}24'$ Est de Paris) il n'est que 11 h 39 m à Paris. La même différence se retrouve en temps moyen et en temps civil. Une montre réglée à Paris *retarde* donc quand le voyageur qui la porte arrive à Strasbourg et inversement.

Cela n'avait pas une grosse importance à l'époque des diligences. Mais, avec les chemins de fer, c'était inacceptable. Aussi la construction du réseau ferré amena à unifier l'heure dans toute la France, en prenant pour heure celle du *temps moyen de Paris*. Jusqu'en 1891, on distinguait l'*heure de la ville* et l'*heure du chemin de fer*. A cette date (loi du 14 mars 1891) l'heure civile moyenne de Paris devint l'heure légale pour toute la France.

En 1911, on adopta, pour toute la France, l'heure en temps moyen civil de Greenwich, ce qui revint à retarder toutes les pendules de 9mn21 s. A cet effet, la loi du 9 mars 1911 prescrit :

• **L'heure légale en France et en Algérie, est l'heure temps civil moyen de Paris, retardée de 9 minutes 21 secondes.**

EXEMPLE. — I. Le cadran solaire qui est sur le mur de la Sorbonne indique, le 1^{er} juillet 1951, qu'il est midi. La table donne : E = 3 mn 34 s.

L'heure légale est :

$$h = 12 \text{ h} - 9 \text{ mn } 21 \text{ s} + 3 \text{ mn } 34 \text{ s} = 11 \text{ h } 54 \text{ mn } 13 \text{ s}.$$

II. Le cadran solaire du Lycée de Nice indique, le même jour, qu'il est midi. La longitude de Nice est 0 h 29 mn 6 s Est de Greenwich.

L'heure légale est :

$$h = 12 \text{ h} - 29 \text{ mn } 6 \text{ s} + 3 \text{ mn } 34 \text{ s} = 11 \text{ h } 34 \text{ mn } 28 \text{ s}.$$

L'adoption de l'heure d'été (1916) a consisté à avancer d'une heure l'heure légale de temps moyen. Depuis 1945, l'heure d'été dure toute l'année.

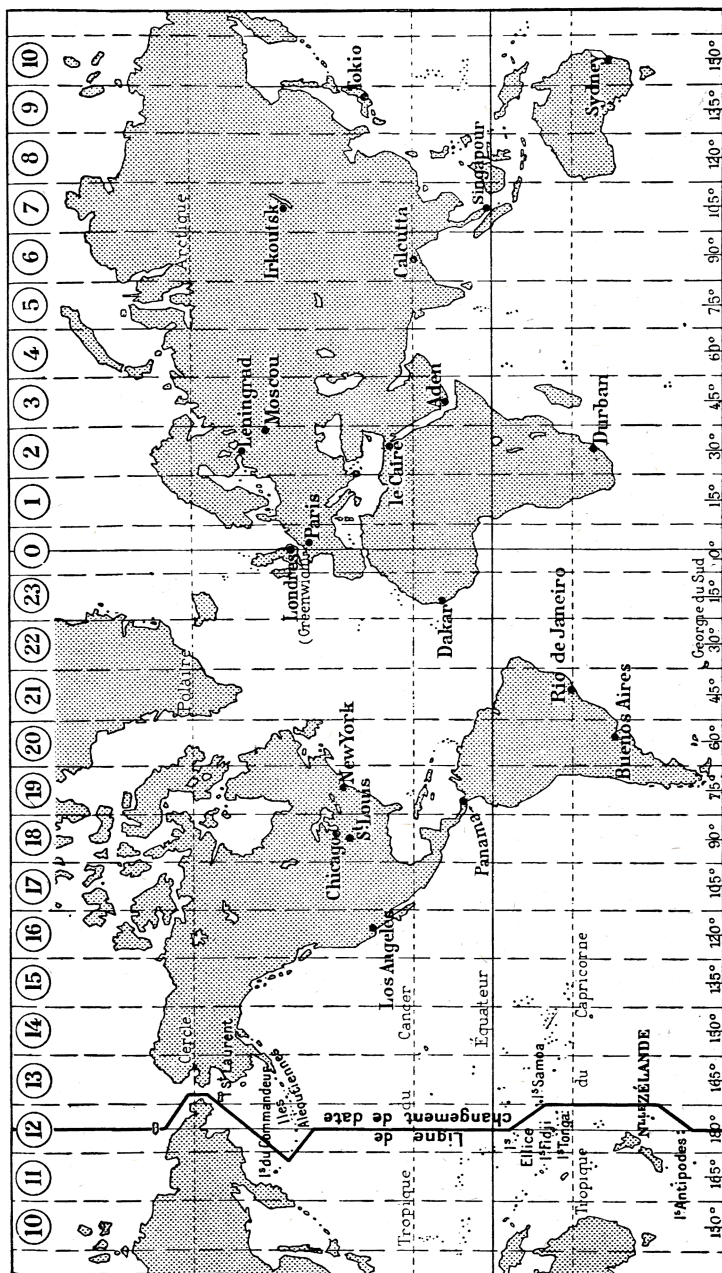


Fig. 99. — Fuseaux horaires et ligne de changement de date.

● **REMARQUE.** — Les travaux à la campagne suivent la marche du Soleil. Ils ne peuvent être interrompus au midi légal, qui partagerait le travail en deux périodes dont la différence, suivant les longitudes, peut atteindre jusqu'à 3 heures. Aussi l'heure d'été est-elle peu suivie dans les campagnes.

■ **79. Temps universel.** — Quand chaque pays employait l'heure de sa capitale, il fallait changer d'heure à chaque passage de frontière. On a voulu réduire cet inconvénient au minimum. C'est le but de la convention internationale de 1911.

● On appelle **temps universel (TU)** le temps civil moyen de Greenwich.

L'emploi des initiales T. M. G. (Temps Moyen de Greenwich) ou G. M. T. (Greenwich Mean Time), est déconseillé.

La Terre est partagée en 24 fuseaux par des méridiens successifs dont les longitudes diffèrent de 15° .

Le fuseau n° 0 a pour méridien central celui de Greenwich. Il est donc limité aux méridiens $7^\circ 30'$ Est et $7^\circ 30'$ Ouest.

Le fuseau n° 1 est le fuseau adjacent vers l'Est. Il s'étend entre les méridiens $7^\circ 30'$ Est et $22^\circ 30'$ Est. On continue ainsi jusqu'au fuseau n° 23, entre les méridiens de longitude Ouest, $22^\circ 30'$ et $7^\circ 30'$.

Le fuseau 0 adopte l'heure moyenne de Greenwich; le fuseau 1 adopte l'heure du méridien de 15° Est, soit l'heure T. U. augmentée de 1 heure, etc.

Par suite :

→ L'heure dans chacun des fuseaux horaires est égale à l'heure de temps moyen de Greenwich, augmentée du numéro du fuseau.

On retranchera 24 h au besoin, du total obtenu par cette règle.

En principe, chaque pays adopte comme heure légale l'heure d'un fuseau auquel il appartient. Le passage d'un pays à un autre, situés dans des fuseaux différents, ne change donc l'heure, en plus ou en moins, que d'un nombre entier d'heures. *Au même moment, la minute et la seconde indiquées par les horloges devraient être les mêmes sur toute la Terre.*

Cette règle n'est d'ailleurs pas encore universellement appliquée.

La carte (fig. 99) montre les fuseaux horaires pour toute la Terre. La carte (fig. 100) montre les lignes réelles de changement d'heure pour l'Europe.

On distingue, en Europe, les fuseaux 0 (heure de l'Europe occidentale); 1 (heure de l'Europe centrale), 2, heure de l'Europe orientale.

Quand un pays s'étend sur plusieurs fuseaux, il précise quelles sont celles de ses provinces qui doivent adopter l'heure de tel ou tel fuseau.

EXEMPLE. — Le Canada s'étend sur **6** fuseaux, l'U. R. S. S. sur **10** fuseaux.

■ **80. Changement de date.** — Suivons, sur la carte figure 99, les heures successives sur la Terre; nous supposons que, dans le fuseau 0, il est 12 heures, un dimanche.

Allons vers l'Est. Dans le fuseau n° 12, il est minuit, le dimanche soir; dans le fuseau 13, il est 1 heure, le lundi.

Mais en allant vers l'Ouest, il est 11 heures dans le fuseau 23, 10 heures dans le fuseau 22, 1 h dans le fuseau 13, toujours le même dimanche.

Ainsi, en abordant le fuseau 13 par l'Est, on devrait s'y trouver le lundi matin 1 h, alors qu'en y allant par l'Ouest, on s'y trouve le dimanche matin 1 h.

Cela impose la nécessité d'un changement de date. Quand on traverse le méridien 180° allant de l'Ouest vers l'Est, il faut diminuer de 1 le quantième du jour; il faut l'augmenter de 1 quand on franchit cette ligne de l'Est vers l'Ouest.

La ligne de changement de date suit, à peu près, le méridien 180° . Pratiquement, comme elle traverse le Pacifique, on l'a tracée de façon à gêner le moins possible en ne séparant pas les groupes d'îles de même nationalité. On l'infléchit de façon à ne pas couper la Sibérie orientale (fig. 99).

Sur tous les bâtiments de la Marine militaire française, le temps est réglé à la mer, d'après le système des fuseaux horaires (décision du 22 mars 1917).

Sur les paquebots, on trouve à bord trois heures différentes :

— l'heure T. U. de Greenwich, qui sert à déterminer les longitudes;

— l'heure du bord, réglée sur le précédent midi vrai observé à bord et qui est modifiée chaque jour;

— l'heure du fuseau horaire traversé, à laquelle on rattache les divers incidents de route. De la sorte, si deux bateaux se croi-

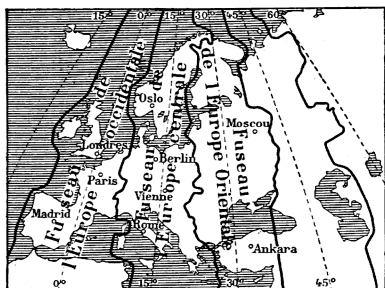


FIG. 100. — Les lignes de changement d'heure, en Europe, si l'on ne tient pas compte de l'heure d'été.

Les limites des fuseaux suivent les frontières des États.

sent, leurs journaux de bord notent le croisement à la même heure, qui est celle du fuseau traversé.

■ **81. Relation entre le temps sidéral et le temps solaire moyen.** — Appelons T le temps sidéral, t_v le temps solaire vrai, t_m le temps solaire moyen, en un lieu de longitude L .

1° Nous connaissons la relation :

$$(1) \quad T = \alpha + H \quad (\alpha = \text{ascension droite, } H = \text{angle horaire}).$$

2° Lorsque l'angle horaire du Soleil est nul, il est *midi vrai*, t_v étant compté à partir de midi.

On aura donc :

$$t_v = H = T - \alpha. \quad (2)$$

3° On sait que :

$$t_m = t_v + E = T - \alpha + E. \quad (3)$$

4° On a enfin :

$$TU = t_m + 12 \text{ h} + L \quad (L \text{ en heures}). \quad (4)$$

Ces formules permettent de déterminer l'heure sidérale en un lieu si l'on connaît l'heure moyenne ou l'heure solaire vraie, pourvu que l'on dispose d'une table des valeurs de α et de E , qui sont valables pour toute la Terre.

Il en résulte qu'une détermination de longitude se fera aussi bien par la différence de deux heures sidérales que par la différence de deux heures solaires vraies, ou de deux heures de temps moyen. La formule (4) donne immédiatement :

$$L = TU - t_m - 12 \text{ h} = TU - t_v - 12 \text{ h} - E$$

Pour la déterminations *du point*, à midi vrai, on a :

$$L = TU - 12 \text{ h} - E.$$

◀ LECTURES ▶

■ **82. Voyage autour du Monde.** — Imaginons un voyageur qui fait le tour du Monde, en se dirigeant vers l'Est. Ce voyageur est parti de Paris, un certain jour, à 8 heures. Il va à petites étapes et règle sa montre chaque jour sur le Soleil, à midi. Tout se passe comme s'il avançait sa montre d'une heure chaque fois que la longitude a augmenté de 15° . Quand la montre du voyageur marque 8 h pour la n^{e} fois, il semble au voyageur que son voyage a duré n jours. Admettons que ce soit l'heure de son retour à Paris, après avoir fait le tour du Monde. En réalité, le voyageur a avancé sa montre d'un jour entier, et son voyage n'a duré que $n - 1$ jours. En se dirigeant vers l'Est, les jours qu'il vit, entre deux midis successifs, sont plus courts que les jours qu'il aurait vécu s'il était resté à Paris.

Si le voyageur va vers l'Ouest, il retarde sa montre et quand la

montre marque 8 heures pour la n^{e} fois, à son retour à Paris, il s'est écoulé $n + 1$ jours depuis son départ. Le voyageur a vécu des jours plus longs que s'il était resté sur place.

Le premier exemple a été utilisé par Jules VERNE pour corser l'intérêt de son roman : *Le Tour du Monde en 80 Jours*. Son héros croit avoir mis 81 jours, alors que son absence n'a été que de 80 jours.

Un voyage de Magellan illustre le second exemple. Parti d'Espagne vers l'Ouest le 20 septembre 1519, il découvrit et franchit le détroit qui porte son nom et fut tué aux Philippines. Un de ses lieutenants revint par le Cap de Bonne-Espérance et put atteindre l'Espagne. Son livre de bord indiquait la date du 6 septembre 1522; la date réelle, en Espagne, était le 7 septembre.

L'application de la règle du changement de date fait disparaître ces difficultés.

A notre époque, nous pouvons imaginer un avion allant à la vitesse de 1 180 km à l'heure, et faisant, d'un seul coup d'aile, le tour du Monde en suivant le 45^e parallèle. Son trajet durera 24 heures. S'il part de Paris à midi, vers l'Ouest, il sera midi pour l'aviateur pendant toute la durée de son trajet, car il se déplace sensiblement avec la vitesse d'un point du 45^e parallèle dans la rotation de la Terre. Il sera de retour à Paris à midi, évidemment le lendemain. Il n'aura pas eu à changer l'heure, mais seulement la date.

■ **83. Transmission de l'heure.** — L'horloge parlante de l'Observatoire de Paris donne en permanence, par téléphone (ODE. 84.00) l'heure exacte ($TU + 1$ h d'été) avec une erreur moindre que $\frac{1}{25}$ de seconde. C'est cette même horloge qui se fait entendre au début de plusieurs émissions journalières de la Radiodiffusion française.

Pour les besoins scientifiques, les postes radiotélégraphiques de S^{te} Assise et de Pontoise émettent sept fois par jour, des signaux horaires, sur les longueurs d'ondes de 3 291 m, 40,39 m, 27,84 m et 21,62 m. Ces signaux sont contrôlés par l'Observatoire de Paris. L'écoute simple permet d'évaluer l'heure d'un signal au moins à une demi-seconde près. La comparaison d'un pendule de temps moyen battant la seconde et des signaux rythmés (61 signaux équidistants par 60 secondes, et commençant à la minute ronde) permet de situer ces signaux à 0,01 s près. Ces signaux sont particulièrement précieux pour la détermination des longitudes. Les émissions s'échelonnent pendant 10 minutes chaque jour, autour de 8 h, 9 h, 9 h 30 mn, 13 h, 20 h, 21 h, 22 h 30 mn (T. U.).

Plusieurs autres postes émettent des signaux analogues dans le monde : Moscou, Tokyo, San Francisco, Rugby (Angleterre), Rio de Janeiro, Honolulu, etc., en tout une centaine d'émissions par jour.

Toute cette organisation est contrôlée par le bureau international de l'Heure (B. I. H.) dont le siège central est à l'Observatoire de Paris.

5

LE CALENDRIER

■ 84. **Année tropique. Année sidérale.** — 1° Rappelons que :

● **L'année tropique** est l'intervalle moyen de temps qui sépare deux équinoxes de printemps consécutifs.

C'est le temps mis par le Soleil pour que sa longitude augmente de 360° à partir de l'équinoxe **mobile**.

La détermination de l'année tropique résulte directement de l'observation, puisqu'on sait déterminer le point γ . Sa durée moyenne s'exprime, en *jours moyens* par

$$365,2422 = 365 \text{ j } 5 \text{ h } 48 \text{ mn } 46 \text{ s}$$

soit un peu moins de 365 jours un quart.

2° A l'équinoxe de printemps, le Soleil est au point γ . Une horloge de temps solaire et une horloge sidérale doivent alors marquer la même heure.

L'année suivante, à l'équinoxe de printemps, le même fait se reproduira; dans l'intervalle, l'horloge sidérale a avancé chaque jour sur l'horloge de temps solaire, et, dans une année, le point γ a fait un tour de plus autour de l'axe du Monde que le Soleil. L'année tropique contient donc :

$$366,2422 \text{ jours sidéraux}$$

La durée du jour sidéral, en temps solaire moyen, est donc la fraction :

$$\frac{3652422}{3662422}$$

de 24 heures moyennes. On trouve :

$$J_s = 23 \text{ h } 56 \text{ mn } 4,09 \text{ s}$$

de temps solaire moyen.

Cette valeur précise découle de la connaissance de la durée moyenne de l'année tropique.

3° Par suite de la précession des équinoxes, quand le Soleil parti de γ_1 recoupe l'équateur à l'équinoxe de printemps suivant, en γ_2 , il n'a pas fait un tour complet; il s'en manque de l'arc $\gamma_1\gamma_2$ (fig. 101).

● On appelle **année sidérale** le temps mis par le Soleil pour que sa longitude augmente de 360° , à partir d'un équinoxe **fixe**.

Dans une année tropique, la longitude du Soleil n'augmente en réalité que de $360^\circ - 50'',26$, puis-que le point γ a rétrogradé de $50'',26$.

On aura donc :

$$\frac{\text{année sidérale}}{\text{année tropique}} = \frac{360^\circ}{360^\circ - 50'',26}$$

On trouve ainsi que l'année sidérale vaut, en *temps moyen* :

$$365,2564 \text{ j} = 365 \text{ j } 6 \text{ h } 9 \text{ mn } 10 \text{ s},$$

soit un peu plus de 365 jours un quart.

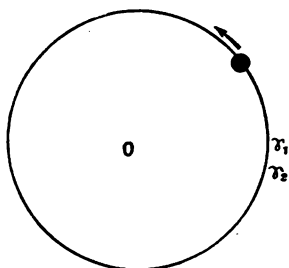


Fig. 101.

● REMARQUE. — La durée moyenne de l'année tropique, diminue de $0'',53$ par siècle. C'est pourquoi la conférence internationale, tenue en 1955 à Dublin, a rattaché l'étalon de temps, (n° 77), à une année tropique particulière, qui est l'année 1900. Cette définition a été confirmée en 1956 par l'Union internationale des physiciens.

■ 85. **Année civile.** — Les occupations humaines sont réglées, dans leur ensemble, par la marche apparente du Soleil, c'est-à-dire : 1° par la rotation de la Terre qui commande le jour et la nuit; 2° par sa translation qui commande le retour des saisons. Aussi deux unités de temps se sont imposées :

le **jour solaire**, qui a été rendu constant par la création du **jour solaire moyen**;

l'**année tropique**, qui en contient 365,2422.

Or, une année, pour être utilisable pratiquement, doit avoir un nombre *entier* de jours. On a été amené à créer :

l'année civile commune qui contient 365 jours,

l'année civile bissextile qui en contient 366.

La répartition de ces deux types d'années civiles, pour assurer la concordance avec le mouvement de la Terre et obtenir la permanence de la position des saisons dans l'année, est le problème posé par l'établissement du calendrier.

■ 86. **Calendrier julien.** — L'année romaine, soumise aux décisions des Pontifes, était mal déterminée. Vers la fin de la République, on en était venu à célébrer au printemps les fêtes de l'automne.

Jules César décida, en l'an 45 avant J.-C. après consultation de l'astronome alexandrin SOSIGÈNE :

1^o de remettre l'équinoxe de printemps à sa place, en allongeant l'année en cours (709 de la fondation de Rome) de 80 jours. Ce fut « l'année de la confusion »;

2^o de créer, tous les 4 ans une année de 366 jours.

Le jour supplémentaire fut placé après le 6^e jour avant les calendes de mars, qui devint un jour *bis*; (*bis sextus Kalendas Martias*), d'où notre adjectif bissextile.

Depuis cette époque, le mois de février des années qui ont un millésime divisible par 4 compte 29 jours au lieu de 28 dans les années ordinaires.

Ainsi l'année julienne compte, en moyenne, 365,25 jours, ce qui peut paraître une bonne approximation.

■ 87. Calendrier grégorien: — L'année julienne est pourtant un peu trop longue :

$$365,25 - 365,2422 = 0,0078.$$

et, en 1 000 ans, le calendrier julien retarde de 7, 8 jours.

En 325, date du Concile de Nicée, l'équinoxe de printemps était le 21 mars, ce qui déterminait la date de Pâques (n^o 88). Mais 1250 ans après, l'équinoxe de printemps arrivait le 11 mars. En 1582, le pape Grégoire XIII voulut rétablir la place de l'équinoxe de printemps au plus près du 21 mars et l'y maintenir. A cet effet, il ordonna :

1^o la suppression de 10 jours, de sorte que le lendemain du jeudi 4 octobre 1582 fut le vendredi 15 octobre.

2^o La suppression de trois jours en 400 ans, en ne conservant comme bissextiles que les années séculaires dont le millésime est un multiple de 400.

EXEMPLES. — Les années 1600, 2000 sont bissextiles; les années 1700, 1800, 1900 sont des années communes.

L'année grégorienne compte donc, en moyenne,

$$365,25 - \frac{3}{400} = 365,2425 \text{ jours.}$$

Elle est un peu trop longue, de 3 dix-millièmes de jour. D'ici 10 000 ans, cela ne sera pas encore bien gênant.

Le calendrier grégorien, adopté après un délai plus ou moins long par tous les États, est actuellement d'un usage universel. Son adoption en France date de décembre 1582; en Angleterre, de 1752.

Pour la liturgie, les chrétientés qui se rattachent à l'Église grecque ont conservé le calendrier julien. La date grégorienne (*nouveau style*) d'un jour quelconque surpasse la date julienne

(*vieux style*) d'un nombre de quantièmes qui augmente de trois unités tous les 400 ans.

EXEMPLE.

<i>Vieux style</i>	<i>Nouveau style</i>	<i>Retard julien</i>
5 oct. 1582	15 oct. 1582	40 j
1 ^{er} mars 1700	12 mars 1700	11 j
1 ^{er} mars 1800	13 mars 1800	12 j
1 ^{er} mars 1900	14 mars 1900	13 j

L'emploi du calendrier grégorien rend à peu près fixe la date de l'équinoxe de printemps; cependant la correction grégorienne ne se fait pas d'une façon continue au cours des 400 ans; aussi cette date oscille entre le 20 et le 21 mars.

REMARQUE. — En Astronomie, pour les longs intervalles de temps, on utilise l'année julienne de 365,25 jours.

■ 88. **Date de Pâques.** — Le Concile de Nicée (325) a fixé la date de Pâques au dimanche qui suit la pleine lune qui a lieu, soit le 21 mars, soit immédiatement après cette date.

Pâques est donc, au plus tôt, le 22 mars. Si la pleine lune a lieu le 20 mars, la suivante sera le 18 avril (29 jours après). Si ce jour est un dimanche, Pâques sera le 25 avril.

Ainsi la fête de Pâques oscille entre le 22 mars et le 25 avril.

Voici les dates de Pâques, de 1950 à 1999. Les dates en *italiques* appartiennent au mois de mars.

Année	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1950. . . .	9	25	13	5	18	10	1	21	2	29
1960. . . .	17	2	22	14	29	18	10	26	14	6
1970. . . .	29	11	2	22	14	30	18	10	26	15
1980. . . .	6	19	11	3	22	7	30	19	3	26
1990. . . .	15	31	19	11	3	16	7	30	12	4

La date de Pâques fixe la date des autres fêtes *mobiles* : *lundi* de Pâques; *Ascension* (sixième jeudi après Pâques); *Pentecôte* (septième dimanche après Pâques) et *lundi* de la Pentecôte.

Le calendrier comprend également des fêtes à date fixe : les fêtes religieuses du 15 août (*Assomption*) du 1^{er} novembre (*Toussaint*), du 25 décembre (*Noël*);

et les fêtes civiles du 1^{er} janvier, du 1^{er} mai (*fête du travail*), du 14 juillet (*fête nationale*), du 11 novembre (*fête de la victoire et de la paix*).

Tous les jours que nous avons énumérés sont *fériés* en France.

La *fête de Jeanne d'Arc* (2^e dimanche de Mai) et celle des *Mères* (dernier dimanche de Mai) sont des fêtes légales, mais, fixées un dimanche, elles n'introduisent pas de jours fériés supplémentaires.

◀ LECTURE ▶

■ **89. Sur le calendrier.** — La division de l'année en *mois* est très ancienne; le mois correspond manifestement à la durée de la lunaison, qui est de 29 jours $\frac{1}{2}$. Certains peuples emploient encore des calendriers à base lunaire; les musulmans ont une année de 12 mois lunaires, alternativement de 29 et de 30 jours, de sorte que l'année n'a que 354 ou 355 jours. Elle ne correspond plus à l'année solaire.

Dans le calendrier grégorien, comme d'ailleurs dans le calendrier julien, l'inégalité des mois a pour objet de laisser à dates à peu près fixes les équinoxes et les solstices. Cette inégalité traduit donc celle des saisons dont nous avons vu la cause.

La *semaine*, de 7 jours, est probablement d'origine israélite; c'est la durée de la création du Monde, d'après la Genèse. Elle fut introduite à Rome par les chrétiens qui l'avaient reçue des Juifs. Les noms des jours évoquent les noms de la Lune et des planètes connues des Anciens, à l'exception de *dimanche* (jour du Seigneur) et *samedi* (jour du sabbat). D'ailleurs, en anglais, *Sunday* et *Saturday* (dimanche et samedi) évoquent le Soleil et Saturne.

Le calendrier étant fixé, on numérote les années à partir d'une date mémorable. Les Romains comptaient leurs années depuis la fondation de Rome. Nous utilisons maintenant pour origine la date de la naissance du Christ (*ère chrétienne*). Pour les années antérieures, on fait suivre le millésime de « *avant J.-C.* », ou du signe —. Mais l'année 1 commence à la naissance du Christ, aussi bien dans un sens que dans l'autre; il n'y a pas d'année 0. La date origine de l'ère chrétienne a d'ailleurs été l'objet d'études récentes; des historiens et des astronomes semblent être d'accord pour conclure à l'allongement de cette ère de 7 ou 8 années.

Les Musulmans comptent les années depuis l'*Hégire*, date du départ de Mahomet de la Mecque, soit 622 de notre ère. Mais les années musulmanes étant plus courtes que les années grégoriennes, la différence des millésimes n'est pas constante et va en diminuant. Ainsi, l'année 1951 grégorienne correspond à l'année 1370 musulmane; la différence est réduite à 581 ans.

Ceux qui s'intéressent à divers calendriers (israélite, copte, chinois, indochinois, malgache), trouveront dans l'Annuaire du Bureau des longitudes les documents nécessaires.

Il serait commode d'avoir un calendrier moins compliqué, ou tous les mois seraient égaux, divisés en parties égales, de sorte que le même quantième de chaque mois correspondrait à un jour de même nom, et où les fêtes actuellement mobiles seraient fixes. Plusieurs projets ont été établis d'un *calendrier perpétuel*. Ils se heurtent à des difficultés sérieuses et à l'opposition de vieilles et respectables traditions. Signalons à ce sujet le *calendrier républicain* qui partageait les mois en 3 *décades* (division renouvelée des Romains). Il n'a été en vigueur que 13 ans, du 22 sept. 1792 au 1^{er} janvier 1806, sans faire pendant ce temps oublier l'ancien. Une autre réforme, proposée par Auguste Comte, utilisait 13 mois de 4 semaines, avec 1 ou 2 jours supplémentaires. Elle semble être tombée dans l'oubli.

EXERCICES SUR LE CHAPITRE III

44. — Quelle est, au solstice d'été, la durée du jour à Lille dont la latitude est $50^{\circ} 38' 44''$? Quelle est la durée du crépuscule civil et celle du crépuscule astronomique?

45. — Mêmes questions pour Perpignan dont la latitude est $42^{\circ} 2' 2''$?

46. — L'heure à Greenwich étant 14 h 25 m, calculer, d'après le système des fuseaux horaires, les heures des lieux de longitudes $172^{\circ} 28'$ Est et $158^{\circ} 9'$ Ouest, les longitudes étant comptées à partir du méridien de Paris.

47. — Par rapport au méridien de Paris, la longitude de Londres est $2^{\circ} 26'$ Ouest et celle d'un autre lieu est $72^{\circ} 34'$ Est. Calculer l'heure solaire vraie de Londres quand il est midi vrai dans l'autre lieu.

48. — Une tige verticale est plantée sur le sol horizontal. Montrer que l'extrémité de l'ombre de cette tige éclairée par le Soleil décrit un arc de conique. Quelle est la nature de cette conique, le jour du solstice d'été, en un lieu de latitude φ . Calculer l'excentricité de cette conique. (Appliquer le théorème de Dandelin.)

49. — On appelle ε l'inclinaison de l'écliptique sur l'équateur, α l'ascension droite du Soleil, δ sa déclinaison, λ la longitude céleste.

1^o Établir les relations :

$$\sin \alpha = \operatorname{tg} \delta \cotg \varepsilon; \quad \sin \delta = \sin \lambda \sin \varepsilon; \quad \cos \lambda = \cos \alpha \cos \delta.$$

2^o Calculer λ connaissant ε et α .

Application : On donne $\varepsilon = 23^{\circ} 27'$ et $\alpha = 9$ h 10 mn. Calculer δ et λ .

50. — A Paris, ($\varphi = 48^{\circ} 50'$), calculer les azimuts du lever et du coucher du Soleil en fonction de la déclinaison δ du Soleil. Étudier les variations de ces azimuts.

51. — Une étoile A ayant été prise provisoirement comme origine des ascensions droites, les coordonnées de Soleil sont, le 20 mars, à midi moyen de Greenwich :

$$\alpha = 7 \text{ h } 12 \text{ mn } 1 \text{ s}; \quad \delta = -0^{\circ} 20' 15''.$$

Le 21 mars, à midi moyen, elles sont :

$$\alpha = 7 \text{ h } 15 \text{ mn } 40 \text{ s}; \quad \delta = 0^{\circ} 3' 27''.$$

On demande :

1^o L'ascension droite du point γ et les ascensions droites véritables du Soleil aux deux observations précédentes.

2^o La date : jour, heure, minutes et secondes de l'équinoxe, en temps moyen de Greenwich.

CARTE DU CIEL

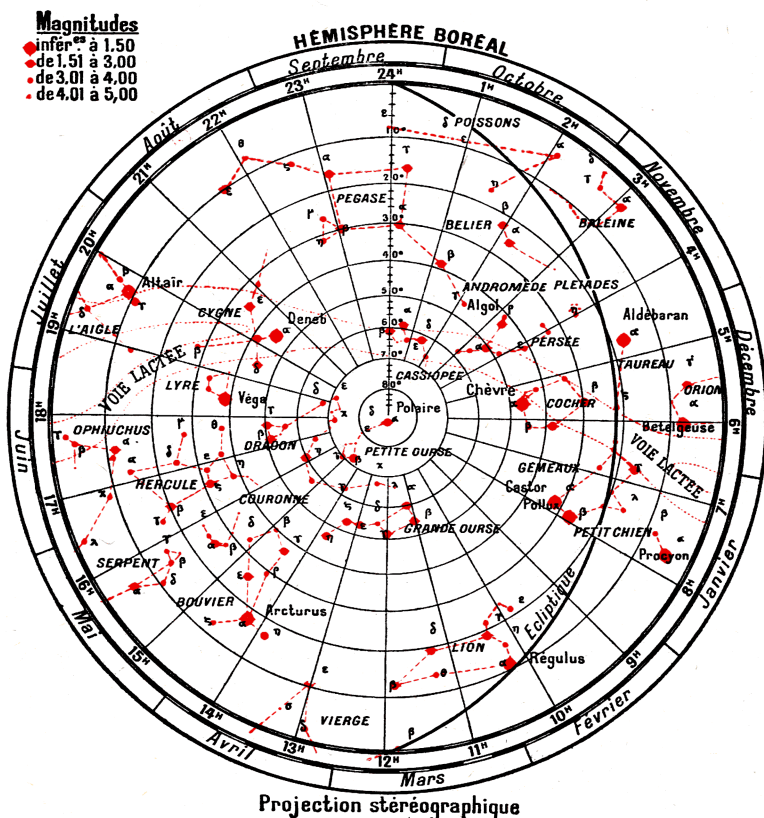


Fig. 102.

Les figures 102 et 103 représentent en projection stéréographique sur le plan de l'équateur céleste l'hémisphère boréal et l'hémisphère austral.

Les parallèles correspondent aux déclinaisons de 10 en 10 degrés. Une division supplémentaire permet d'apprécier les déclinaisons de 2 en 2 degrés.

Les méridiens donnent les ascensions droites de 0 à 24 heures, ce qui permet d'apprécier les heures à quelques minutes près.

CARTE DU CIEL

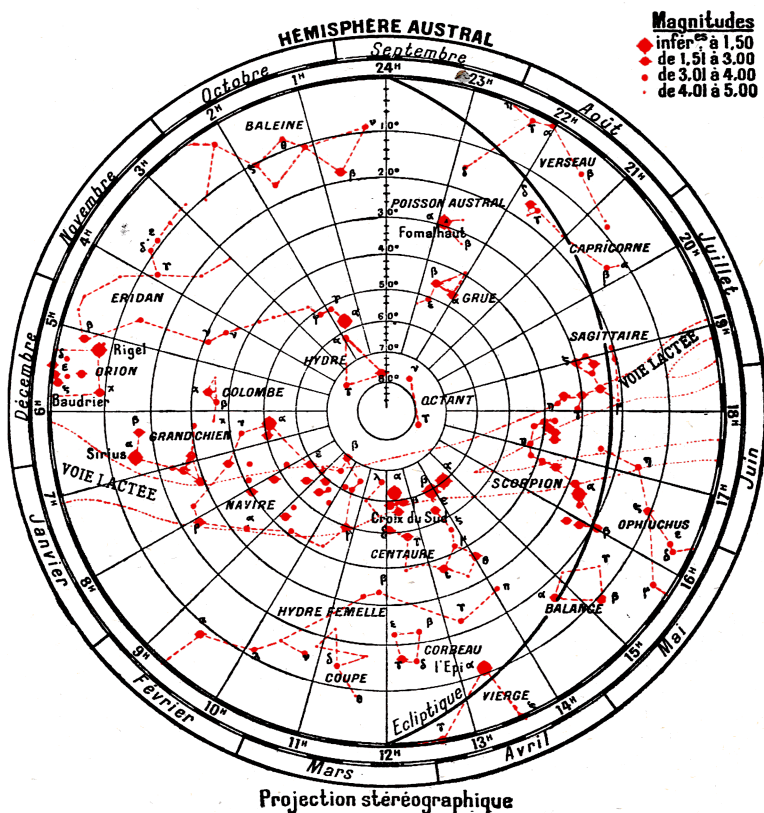


Fig. 103.

Pour utiliser cette carte, il faut l'orienter, ce qui revient à placer sur la carte le zénith du lieu de l'observation, à la date et à l'heure de l'observation. Cela revient à déterminer :

- 1° La déclinaison du zénith;
- 2° le numéro du cercle horaire sur lequel il se trouve.

1° **Déclinaison.** — La déclinaison du zénith est égale à la latitude du lieu.

EXEMPLE. — A Nantes, $\varphi = 47^\circ$. (Nous négligeons les fractions.) Le zénith est sur le cercle ayant pour centre le pôle et passant par la division 47.

2° Le zénith à 24 heures. — Remarquons, qu'à l'équinoxe de printemps, le point γ , qui ce jour est confondu avec le centre du Soleil, passe au méridien à 12 h, temps civil (à quelques minutes près). Donc à 12 h, le zénith est sur le cercle horaire 0 h; à 24 h, il est sur le cercle horaire de 12 h.

Pour une autre date, rappelons que γ retarde de 4 mn par jour, donc de 2 h par mois. Ainsi, le 21 juin, le zénith est, à 24 h, sur le cercle horaire de 18 h.

On a tracé une seconde division concentrique aux heures, en 12 mois, le 21 mars correspondant au cercle horaire de 12 h. Les mois ont été divisés en fractions égales de 5 jours, la dernière fraction correspondant à 5 ou 6 jours (4 jours en février). De sorte qu'il suffit de lire la date sur ce cercle pour avoir, au-dessous, le cercle horaire du zénith, à cette date, à 24 h.

EXEMPLE. — Le 15 août, à 24 heures, le zénith est sur le cercle horaire 21 h 30.

3° Le zénith à l'heure h_0 . — Il suffit, connaissant le cercle horaire du zénith à 24 h de lui ajouter h_0 . On retranchera 24 h au résultat s'il y a lieu.

Le zénith étant placé, on peut tracer le cercle qui limite, au lieu choisi, la partie visible du Ciel. Son diamètre est déterminé par les points situés à 90° du zénith, sur le méridien qui passe par le zénith.

EXEMPLE. — A Nantes, à 22 heures, le 15 août, le zénith est sur le cercle horaire : 21 h 30 mn + 22 h — 24 h = 19 h 30 mn

Il est donc tout près de l'étoile δ du Cygne.

A 2 heures, il serait sur le cercle horaire :

$$21 \text{ h } 30 \text{ mn} + 2 \text{ h} = 23 \text{ h } 30 \text{ mn}$$

(entre le carré de Pégase et la Polaire).

● REMARQUE. — Toutes les heures indiquées sont en *temps civil local*. Il faudra donc commencer par exprimer en temps civil local l'heure de l'observation.

EXEMPLE. — L'observation ayant lieu à Nantes à 22 h 30, temps légal, l'heure en temps civil local est :

Temps légal :	22 h 30 mn
Correction de longitude :	— 6 mn (L = $1^\circ 33'$ W Greenwich)
Correction d'heure d'été	— 1 h
Temps civil local :	21 h 24 mn

Ces calculs ne sont qu'approximatifs, mais suffisent pour orienter la carte et l'utiliser.

On peut se dispenser de tout calcul si l'on connaît bien quelques constellations remarquables. L'orientation de la carte se fait alors directement.

CHAPITRE IV

LA LUNE

- 1. *Mouvements de la Lune.*
- 2. *Phases de la Lune.*
- 3. *Éclipses de Lune.*
- 4. *Éclipses de Soleil.*

1

MOUVEMENTS DE LA LUNE

■ **90. Mouvement apparent.** — 1° La Lune se lève à l'est et se couche à l'ouest. Elle participe donc au mouvement diurne, qui est dû à la rotation de la Terre. Mais le passage de la Lune au méridien retarde d'un jour à l'autre de 50 minutes environ, de sorte que le jour « lunaire » est plus long que le jour sidéral et que le jour solaire. Aussi, certains jours solaires, il n'y a pas de lever de la Lune, et certains autres, il n'y a pas de coucher.

EXEMPLES :

15 août 1952; 4 avril 1953 : pas de lever.
27 octobre 1952, 21 juin 1953 : pas de coucher.

2° La Lune a un aspect qui change d'une nuit à l'autre, (fig. 104). On la voit sous forme d'un disque circulaire (1), d'un

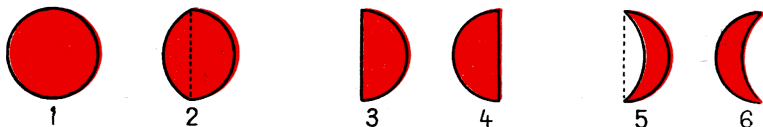


Fig. 104. — Divers aspects de la Lune.

demi-cercle augmenté d'un segment (2), d'un demi-cercle presque parfait (3) et (4), ou d'un croissant (5) et (6). Dans tous les cas, le diamètre du disque apparaît; on peut donc mesurer le diamètre apparent de la Lune, dont la valeur moyenne est 31'.

On peut également observer le centre du demi-cercle et en déterminer les coordonnées.

Dans le cas de la pleine Lune on opère comme pour le Soleil. Dans les autres cas, on prend la hauteur du point du demi-cercle où la tangente est horizontale et on corrige cette hauteur du demi-diamètre apparent. La même méthode sert pour déterminer l'ascension droite du centre. Les résultats d'observation sont rapportés au centre de la Terre. Cette correction n'est pas négligeable pour la Lune.

Les observations faites pendant un mois environ mettent en évidence le grand cercle de la sphère céleste que la Lune semble décrire, en restant dans le zodiaque, donc au voisinage du plan de l'écliptique.

Ce cercle est incliné d'environ 5° sur le plan de l'écliptique; il est décrit dans le sens direct.

L'inclinaison de ce cercle n'est pas constante; le point λ où il coupe l'écliptique quand la latitude de la Lune cesse d'être

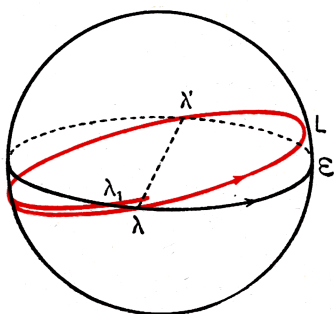


Fig. 105.

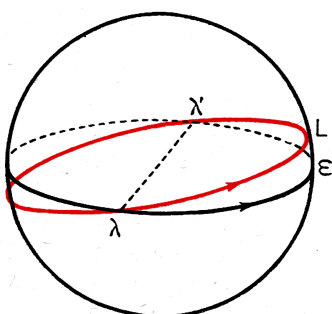


Fig. 106.

négative pour devenir positive, n'est pas fixe; la trajectoire apparente n'est donc pas réellement un cercle (fig. 105). Comme ces variations sont lentes, il est commode de dire :

→ La lune semble décrire un grand cercle de la sphère céleste, mais ce cercle est mobile.

C'est par rapport à l'écliptique que l'on étudie les variations de l'orbite lunaire.

Cette orbite L coupe l'écliptique en deux points diamétralement opposés, λ et λ' , appelés **nœuds** (fig. 106).

Le nœud λ , pour lequel la latitude céleste de la Lune s'annule en passant des valeurs négatives aux valeurs positives est dit le **nœud ascendant**; le point λ' est le **nœud descendant**.

L'orbite lunaire est définie par la longitude du nœud ascendant et par l'inclinaison de son plan sur l'écliptique.

La longitude du nœud ascendant diminue de 1° et demi environ à chacun des passages de la Lune. Le point λ a donc un mou-

vement rétrograde, qui lui fait parcourir l'écliptique en 18 ans 8 mois.

L'inclinaison varie entre 5° et $5^\circ 18'$, la période de cette variation étant 173 jours.

Quand la longitude du nœud ascendant est nulle, λ est confondu avec γ . L'écliptique (ϵ) se trouve entre l'équateur (E) et l'orbite lunaire (fig. 107). La déclinaison maximum de la Lune ne peut donc dépasser :

$$23^\circ 27' + 5^\circ 18' = 28^\circ 45'.$$

La déclinaison de la Lune est donc comprise entre

$$-28^\circ 45' \quad \text{et} \quad +28^\circ 45'.$$

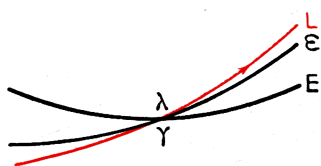


Fig. 107.



Fig. 108.

Quand la longitude du nœud ascendant est 180° , l'orbite lunaire est située entre l'écliptique (ϵ) et l'équateur (E) car c'est le nœud descendant λ' qui est au point γ (fig. 108).

Dans ce cas, la déclinaison de la Lune ne dépasse pas :

$$23^\circ 27' - 5^\circ = 18^\circ 27'.$$

■ 91. **Parallaxe de la Lune.** — Soit A_1 et A_2 deux observatoires terrestres de latitudes φ_1 et φ_2 , situés sur un même méridien, et L le centre de la Lune à son passage au méridien commun à A_1 et A_2 . On peut mesurer la distance zénithale de la Lune, soit z_1 en A_1 et z_2 en A_2 (fig. 109).

Le quadrilatère A_1OA_2L est alors déterminé, puisqu'on connaît

ses angles et les côtés OA_1 et OA_2 , rayons terrestres.

Le calcul est simple, si $OA_1 = OA_2 = R$ et si A_1 et A_2 ont rigoureusement la même longitude.

On a, dans le triangle A_1OL :

$$\frac{OL}{\sin z_1} = \frac{R}{\sin P_1} \quad (1)$$

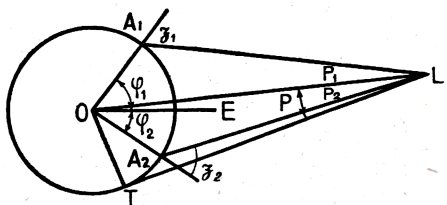


Fig. 109.

et dans le triangle A_2OL :

$$\frac{OL}{\sin z_2} = \frac{R}{\sin P_2} \quad (2)$$

En divisant membre à membre, on trouve :

$$\frac{\sin P_1}{\sin P_2} = \frac{\sin z_1}{\sin z_2} = \frac{P_1}{P_2}, \quad (3)$$

P_1 et P_2 étant de petits angles dont le sinus peut être remplacé par les angles exprimés en radians.

La *parallaxe horizontale* P , définie comme pour le Soleil, est l'angle OLT :

$$OL = \frac{R}{\sin P} = \frac{R}{P}. \quad (4)$$

En portant cette valeur de OL dans (1), on a :

$$\frac{R}{P \sin z_1} = \frac{R}{\sin P_1} = \frac{R}{P_1}$$

$$\text{d'où :} \quad P = \frac{P_1}{\sin z_1}. \quad (5)$$

Si les points A_1 et A_2 sont choisis de part et d'autre de l'équateur, l'angle A_1OA_2 est égal à la somme $\varphi_1 + |\varphi_2|$ des valeurs absolues des latitudes des deux points. On aura donc :

$$\varphi_1 + |\varphi_2| + P_1 + P_2 = z_1 + z_2$$

$$\text{d'où :} \quad P_1 + P_2 = z_1 + z_2 - (\varphi_1 + |\varphi_2|)$$

tous les angles étant exprimés en radians.

On tire alors de (3) et de (5) :

$$P = \frac{P_1}{\sin z_1} = \frac{P_2}{\sin z_2} = \frac{P_1 + P_2}{\sin z_1 + \sin z_2} = \frac{z_1 + z_2 - (\varphi_1 + |\varphi_2|)}{\sin z_1 + \sin z_2}.$$

En réalité, les calculs sont plus compliqués pour tenir compte de la différence des longitudes, qui n'est pas rigoureusement nulle, et aussi parce que la Terre n'est pas sphérique.

Cette détermination de parallaxe fut faite en 1751 par LALANDE opérant à Berlin et l'abbé LA CAILLE, opérant au Cap.

La parallaxe horizontale de la Lune varie entre $52'$ et $62'$. Sa valeur moyenne est $57'$.

● REMARQUE. — La méthode précédente n'a pu servir à déterminer la parallaxe horizontale du Soleil, les erreurs de mesure étant, dans ce cas, du même ordre de grandeur que la parallaxe à déterminer.

■ **92. Trajectoire de la Lune par rapport à la Terre.** — Le diamètre apparent de la Lune varie de $28'22''$ à $33'50''$. La valeur moyenne est $31'4''$. Il en résulte, comme de la variation de la parallaxe, que la distance de la Terre à la Lune est variable.

En procédant comme pour le Soleil, on conclut :

→ Le centre de la Lune décrit, suivant la loi des aires, une ellipse dont le centre de la Terre est un des foyers.

L'excentricité de l'ellipse est $\frac{1}{18}$ environ.

Mais le mouvement de la Lune, sur son orbite elliptique, est soumis à des irrégularités nombreuses et sensibles, et le résultat précédent n'est qu'un résultat approché.

■ **93. Distance de la Terre à la Lune.** — La formule établie au N° 91 :

$$OL = \frac{R}{\sin P}$$

permet le calcul de OL connaissant le rayon équatorial terrestre. Les résultats sont les suivants :

pour $P = 52'$, on trouve :

$$OL = 66,113 \text{ R.}$$

pour $P = 62'$, on trouve :

$$OL = 55,451 \text{ R.}$$

Nous retiendrons, comme distance moyenne, 60 R, ou 380 000 km avec une variation en plus ou en moins, de 6 R.

Remarquons que le rayon du Soleil (109 R) est presque le double de cette distance.

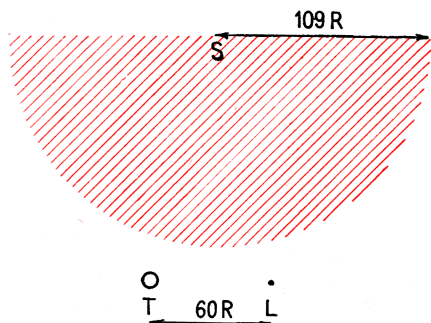
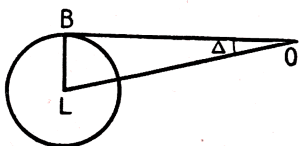


Fig. 110. — Dimensions comparées du Soleil et de l'orbite de la Lune.

■ **94. Rayon de la Lune.** — Soit OL la distance de la Terre à la Lune, Δ le demi-diamètre apparent, LB, le rayon de la Lune. On a :



$$LB = OL \sin \Delta.$$

Si nous prenons la parallaxe maximum, la distance OL est 55,451 R, et le demi-diamètre

Fig. 111.

apparent est maximum, soit $16'55''$. On a alors, ρ étant le rayon de la Lune :

$$\rho = R \times 55,451 \times \sin 16'55''$$

$$\boxed{\rho = 0,272 R} \quad \text{soit } 1\,736 \text{ km.} \quad \text{ou} \quad \frac{3}{11} R.$$

Le volume de la Lune est environ $\frac{1}{50}$ de celui de la Terre.

■ **95. Conjonction. Opposition.** — La lune et le soleil sont en **conjonction** quand ils ont même longitude céleste.

Ils sont en **opposition** si leurs longitudes célestes diffèrent de 180° .

La conjonction et l'opposition portent encore le nom de **syzygies**.

Lorsque les longitudes du Soleil et de la lune diffèrent de 90° , ces astres sont dits en **quadrature**.

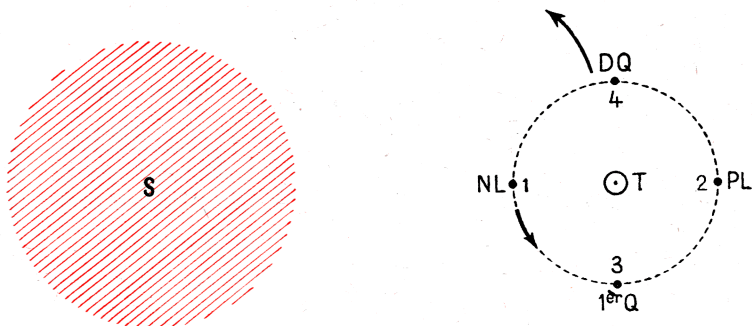


Fig. 112. — Conjonction; quadratures; opposition.

Sur l'orbite lunaire (fig. 112), représentée autour de la terre T, dans la position 1, la lune et le Soleil sont en **conjonction** (NL)
 dans la position 2, — **opposition** (PL)
 dans les positions 3 et 4, — **quadrature** (quartiers).

A la conjonction et à l'opposition, le Soleil, la Terre et la Lune n'ont leurs centres alignés que dans le cas où la Lune se trouve à l'un des nœuds.

■ **96. Révolution synodique.** — Le mouvement de la Lune, en longitude, n'est pas uniforme, pas plus que celui du Soleil. L'intervalle de temps qui sépare deux conjonctions successives n'est donc pas constant. On en a calculé une valeur moyenne.

● On appelle **révolution synodique** de la Lune la valeur moyenne de l'intervalle de temps qui sépare deux conjonctions consécutives de la Lune et du Soleil.

On donne aussi à cet intervalle le nom de *mois lunaire*, ou *lunaison*.

Sa durée est 29 j 12 h 44 mn de temps moyen. Nous retiendrons :

$$S = 29 \text{ jours et demi.}$$

La différence entre deux lunaisons successives est sensible.

EXEMPLE. — Nous relevons, pour 1951, les conjonctions suivantes :

Dates	Heures	Durée de la lunaison
2 août	22 h 39 mn	} 29 j 14 h 10 mn 29 j 13 h 8 mn 29 j 11 h 57 mn
1 ^{er} sept.	12 h 49 mn	
1 ^{er} oct.	1 h 57 mn	
30 oct.	13 h 54 mn	

■ 97. **Révolution sidérale.** — La figure 113 représente la sphère céleste, l'écliptique $\varepsilon\varepsilon'$ et l'orbite lunaire LL' . A l'époque d'une conjonction, la Lune est en A et le Soleil en S. A la conjonction suivante, le Soleil est en S' , ayant parcouru l'arc SS' et la Lune est en A' , ayant parcouru l'orbite lunaire en entier, et en plus l'arc AA' .

Quand la Lune est revenue en A, sa longitude, comptée à partir d'un point fixe de l'écliptique, a augmenté de 360° .

● On appelle **révolution sidérale** de la Lune la valeur moyenne de l'intervalle de temps nécessaire pour que la longitude de la Lune, comptée à partir d'une équinoxe fixe, augmente de 360° .

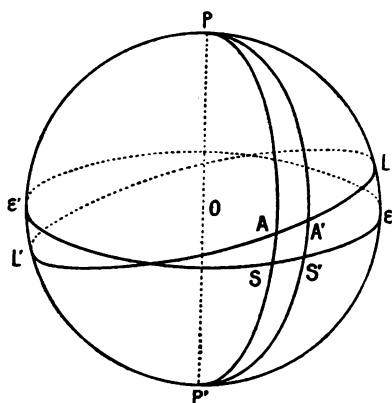


Fig. 113.

On peut obtenir la durée de la révolution sidérale par l'observation ou par le calcul.

Par l'observation : c'est, très sensiblement, la durée qui sépare deux passages de la Lune devant une même étoile.

Par le calcul en admettant que les mouvements en longitude du Soleil et de la Lune sont uniformes.

Soit T la révolution sidérale de la Lune, S la révolution synodique, A la durée de l'année sidérale (exprimées en jours solaires moyens).

Pendant un jour solaire moyen, la longitude de la Lune augmente de $\frac{360^\circ}{T}$; celle du Soleil augmente de $\frac{360^\circ}{A}$.

Par suite, l'avance de la Lune sur le Soleil est par jour, de :

$$\frac{360}{T} - \frac{360}{A}.$$

Pendant les S jours de la lunaison, l'avance est de 360° . On a donc :

$$\left(\frac{360}{T} - \frac{360}{A}\right) \times S = 360$$

ou :

$$\frac{1}{T} - \frac{1}{A} = \frac{1}{S}.$$

En faisant le calcul, on trouve :

$$T = 27 \text{ j } 7 \text{ h } 43 \text{ mn.}$$

C'est une valeur moyenne, car S est également une valeur moyenne.

Nous retiendrons :

$$T = 27 \text{ j } \frac{1}{3}.$$

EXERCICES

52. — Quand la déclinaison de la Lune atteint 28° , combien d'heures s'écoulent entre son lever et son coucher en un lieu de latitude φ ? On supposera que la déclinaison reste constante pendant le temps considéré.
Application : $\varphi = 45^\circ$.

53. — Quelle est la hauteur maximum que peut atteindre la Lune à Paris? ($\varphi = 48^\circ 50'$).

La Lune peut-elle passer au zénith d'un point situé en France?

54. — On relève sur un annuaire, les heures du lever et du coucher de la Lune, à Paris :

15 nov. 1951.	Lever : 16 h 45 mn;	Coucher : 9 h 15 mn
29 — — .	— : 8 h 19 mn;	— : 15 h 42 mn.

Calculer la durée, dans les deux cas, pendant laquelle la Lune est restée au-dessus de l'horizon.

2

PHASES
DE LA LUNE

■ 98. La Lune est éclairée par le Soleil. — Il suffit d'observer la Lune pour faire les remarques suivantes :

1^o La convexité du demi-cercle qui limite le croissant, ou le quartier, est toujours tournée du côté où se trouve le Soleil.

2^o Quand la Lune passe devant une étoile, l'étoile ne disparaît pas seulement derrière la partie visible de la Lune, mais encore derrière ce qui reste invisible du disque lunaire (fig. 114).

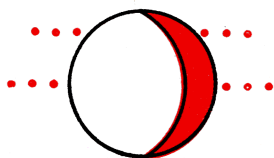


Fig. 114. — La Lune passant devant les étoiles.

Ces *occultations* sont faciles à observer, surtout entre les quartiers et la nouvelle lune. La durée de l'occultation dépasse une heure; elle est variable suivant la latitude du point occupé par l'observateur.

On en conclut que la Lune est un astre obscur, c'est-à-dire sans lumière propre émise par lui-même, et que *ce que nous apercevons est la partie de cet astre éclairée par le Soleil.*

● On appelle **phases de la Lune** les aspects successifs pris par la Lune éclairée par le Soleil, et vue de la Terre.

La succession invariable des phases de la Lune a nécessairement frappé l'esprit des hommes; une unité de temps naturelle s'en déduisait, et les plus anciens calendriers sont lunaires.

■ 99. Détermination d'une phase de la Lune. — Prenons pour plan horizontal de projection le plan déterminé par le centre de la Lune, et les directions des centres du Soleil et de la Terre.

Sur ce plan, la Lune se projette suivant un cercle. Les rayons (sensiblement parallèles) issus du Soleil éclairent l'hémisphère lunaire qui se projette suivant le demi-cercle de diamètre *cd*, perpendiculaire à la direction *OS*.

De la Terre, on voit l'hémisphère lunaire situé en avant du grand cercle qui se projette horizontalement suivant le diamètre *ab*, perpendiculaire à la direction *OT*.

Nous obtenons la projection frontale de cet hémisphère, sur un plan perpendiculaire à *OT*, en traçant le cercle de centre *O'*, égal au cercle de diamètre *ab*.

cd est la projection horizontale du cercle d'illumination de la Lune, ou cercle *terminateur*. La projection frontale de ce cercle

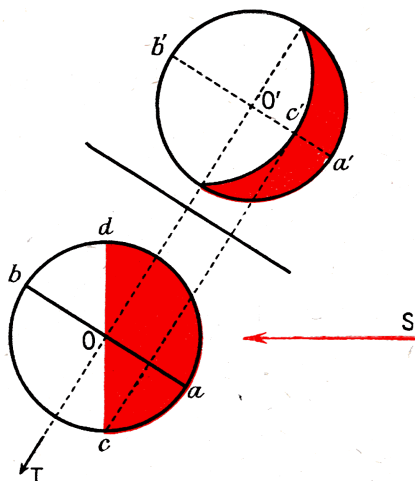


Fig. 115. — Une phase de la Lune.

est une ellipse de centre O' , dont le grand axe est le diamètre de la Lune perpendiculaire à $a'b'$, et dont le $\frac{1}{2}$ petit axe est $O'c'$, projection de Oc .

On ne voit que la partie éclairée, donc celle qui est la projection frontale du secteur sphérique compris entre Oa et Oc . La figure 115 a été faite dans le cas où la Lune a la forme d'un croissant. La construction ci-dessus dépend uniquement de la grandeur de l'angle des directions OT et

OS . L'angle $\overrightarrow{OT} \cdot \overrightarrow{OS}$ est appelé l'*angle de phase*.

■ **100. Phases successives de la Lune.** — Nous avons représenté (sans conserver les proportions) l'orbite lunaire autour de la Terre, et avons pris le plan de cette orbite pour plan horizontal de projection.

La direction du Soleil étant représentée, perpendiculaire au cercle d'illumination de la Terre, nous allons déplacer la Lune sur son orbite depuis une conjonction jusqu'à la conjonction suivante, en prenant la direction Terre-Soleil comme repère.

1^o Nouvelle lune. — Dans la position (1), la Lune est en *conjonction* avec le Soleil. Elle tourne vers la Terre son hémisphère obscur. Elle est donc invisible. C'est la **nouvelle lune**.

Ayant sensiblement même longitude que le Soleil, elle se lève comme lui et se trouve pendant le jour au-dessus de l'horizon.

Dans la position (2), la lune s'est écartée du Soleil vers l'Est. Elle est en retard sur lui (de 50 m par jour) et paraît donc le *soir*, après le coucher du Soleil, dans la région Ouest du Ciel, sous la forme d'un croissant dont la convexité est vers l'Ouest.

Remarquons qu'à ce moment, la Terre tourne vers la Lune une partie éclairée; par réflexion, il y a *clair de Terre* sur la Lune. On le voit à une teinte gris bleuté sur la partie du sol lunaire non éclairé directement par le Soleil. C'est la *lumière cendrée* de la Lune.

Le croissant s'élargit chaque soir un peu plus, et, 7 j $\frac{1}{2}$ après la nouvelle Lune, la Lune et le Soleil sont en *quadrature*.

2^o Premier quartier. — Dans la position (3), on voit la moitié de la Lune tournée vers l'Ouest. La Lune a pris 6 heures

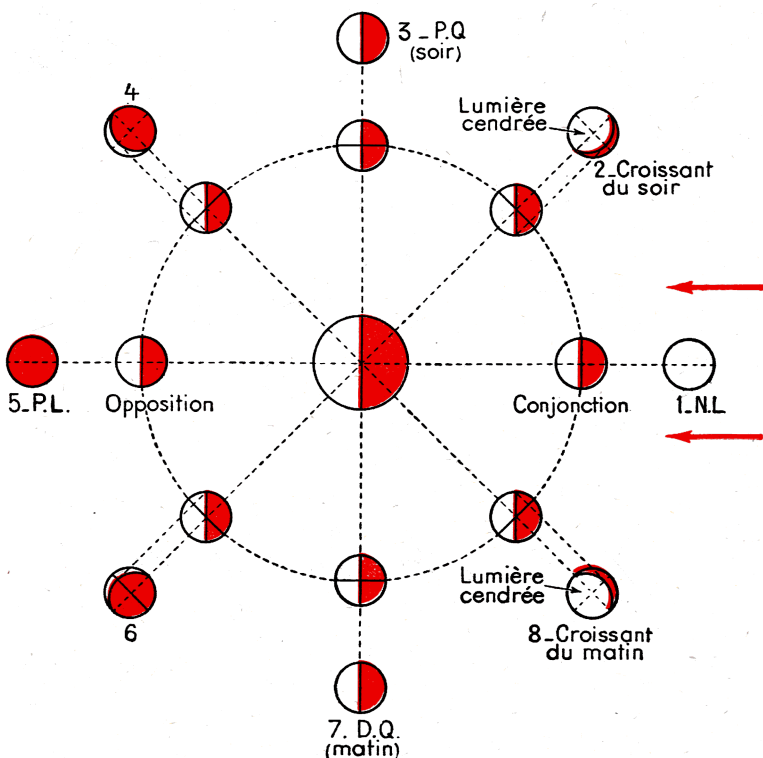


Fig. 116. — Les phases de la Lune.

de retard sur le Soleil; elle se lève vers midi et passe au méridien vers 6 heures du soir. Elle est donc *visible dans la première moitié de la nuit*. C'est le **premier quartier**.

Dans la position (4), trois ou quatre jours après, la Lune a continué à croître. Elle présente maintenant une gibbosité du côté opposé au Soleil.

Elle croît ainsi jusqu'à l'*opposition*.

Toute cette partie des phases, depuis la nouvelle Lune, constitue la Lune *croissante*, ou Lune *montante*.

3° **Pleine Lune.** — Dans la position (5), la Lune et le Soleil sont en *opposition*. La Lune est visible sur tout le disque : c'est la **pleine Lune**.

Elle a douze heures de retard sur le Soleil; elle se lève donc le soir, culmine vers minuit, et se couche le matin.

Elle commence alors à décroître; dans la position (6) elle est encore gibbeuse, mais se lève après le coucher du Soleil. On la voit encore le matin, vers l'Ouest, au lever du Soleil.

4° **Dernier quartier.** — Dans la position (7), la Lune et le Soleil sont de nouveau en quadrature. On voit la moitié du disque lunaire. Mais la Lune a 18 heures de retard sur le Soleil; elle n'éclaire que pendant la seconde moitié de la nuit.

Nous retrouvons, dans la position (8) la forme du croissant, visible le matin avant le lever du Soleil. Il disparaîtra bientôt pour faire place à une nouvelle Lune.

Les phases successives de la pleine Lune à la nouvelle Lune constituent la Lune *décroissante*, ou *descendante*.

● **REMARQUES.** — 1° Pour avoir, sur la figure 116, l'aspect de la lune à chacune des positions représentées, il faut se supposer placé en T et regarder la projection frontale correspondante, en faisant au besoin tourner la figure. Ainsi, on aura les aspects que nous reproduisons ci-dessous (fig. 117).

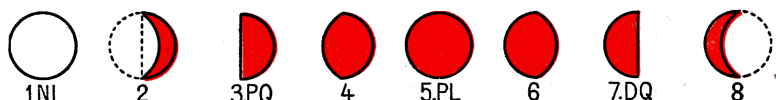


Fig. 117. — Les phases de la Lune.

On remarquera que dans tous les cas, la convexité du demi-cercle est tournée du côté du Soleil.

2° Les mouvements en longitude de la Lune et du Soleil n'étant pas uniformes, la lunaison n'est pas divisée en quarts égaux par les syzygies et les quadratures.

EXEMPLE.

Phases	Sept. 1951		Durée des quartiers
NL	le 1 ^{er}	à 12 h 49 m	7 j 5 h 27 m 6 j 18 h 22 m 7 j 15 h 35 m 7 j 21 h 44 m
PQ	le 8	à 18 h 16 m	
PL	le 15	à 12 h 38 m	
DQ	le 23	à 4 h 13 m	
NL	le 1 ^{er} oct	à 1 h 57 m	

■ **101. Rotation de la Lune.** — On observe à la surface de la Lune des taches, des dessins, qui conservent toujours la même forme et qui, vus à la lunette, apparaissent comme des accidents de sa surface.

Or, depuis que des observations de la Lune ont été faites et leurs résultats consignés, ces taches conservent la même position par rapport au centre de la Lune.

Il faut en conclure que, pendant que la Lune tourne autour de la Terre, elle tourne sur elle-même de façon à présenter à la Terre toujours le même hémisphère, ce qui nécessite une rotation de 360° pendant une révolution sidérale de la Lune.

En effet, pour que le point A de la Lune (fig. 118) reste sur le rayon OL, il faut quand la Lune passe de L en L' que le point A ait tourné autour du centre de la Lune d'un angle égal à LOL' .

L'égalité des deux durées de rotation doit être rigoureuse; s'il y avait une légère différence entre elles, le décalage s'accroîtrait avec le temps et les taches actuellement visibles paraîtraient se déplacer. Or les observations les plus anciennement notées ont toujours montré la Lune telle que nous la voyons aujourd'hui.

Nous ne connaissons donc qu'un des côtés de la Lune.

● **REMARQUE.** — L'axe de rotation de la Lune est incliné de $88^\circ 28' 38''$ sur le plan de l'écliptique. Son inclinaison sur le plan de l'orbite lunaire varie de $83^\circ 41'$ à $83^\circ 29'$. Le plan de l'équateur de la Lune passe toujours par la ligne des nœuds.

■ **102. Libration.** — Cependant, nous voyons un peu plus d'un hémisphère, par suite des irrégularités du mouvement de la Lune; c'est le phénomène de la *libration apparente* de la Lune.

1° La rotation de la Lune sur elle-même est uniforme, tandis que son mouvement autour de la Terre suit la loi des aires. La Lune semble ainsi osciller autour de son axe, ce qui permet de voir au-delà de chaque bord moyen un fuseau de 8° : c'est la *libration en longitude*.

2° L'axe de rotation de la Lune n'est pas perpendiculaire au plan de l'orbite; il fait avec ce plan un angle de 83° environ. Par

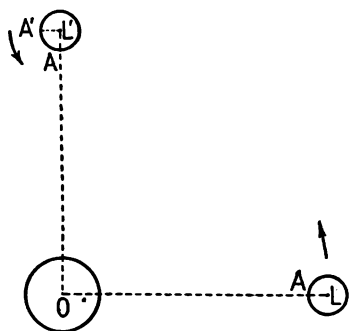


Fig. 118.

suite, à chaque révolution sidérale, les pôles de la Lune semblent osciller en avant ou en arrière du plan de contour apparent, de près de 7°. C'est la *libration en latitude*.

3° L'observateur, entraîné par la rotation de la Terre se déplace de part et d'autre de la droite des centres, ce qui lui permet de voir 1° de plus de la Lune. C'est la *libration diurne*.

En définitive, l'observation terrestre s'applique aux 0,6 de la surface de la Lune. Mais, en 1959, une fusée porteuse soviétique a pu photographier automatiquement la face encore inconnue.

■ 103. Aspect et constitution physique de la Lune. — La proximité de la Lune permet d'en prendre de bonnes photographies.

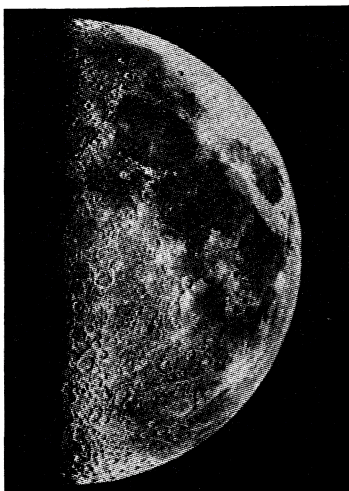


Fig. 119.

La Lune au premier quartier.

Photo Loevy et Puiseux, communiquée par l'Observatoire de Paris.

Des atlas ont pu être dressés de la partie visible, et on peut dire que les détails de sa surface sont bien connus.

1° La Lune ne possède pas d'atmosphère. La netteté du terminateur, lors d'un quartier (fig. 119), l'absence de réfraction ou d'absorption de la lumière, lors des occultations d'étoile et des éclipses de Soleil, en sont la preuve.

2° La surface de la Lune apparaît comme ayant un relief tourmenté. On y voit des chaînes de montagnes, dont on a pu mesurer l'altitude par la longueur des ombres portées (fig. 120), de vastes cirques aux parois escarpées, et d'innombrables petits cirques, qui donnent à certaines

régions de la Lune l'aspect d'une zone après un bombardement sévère (fig. 121). De grandes taches grisâtres peu accidentées ont reçu le nom de *mers*; ce sont de vastes bassins au fond légèrement ondulé, souvent crevassé, et vraisemblablement au sol poussiéreux. Le mot de mer est donc impropre; il n'y a pas trace d'eau sur la Lune. Mers, cirques, montagnes de la Lune ont reçu des noms que les curieux de sélénographie trouveront dans les Atlas, mais que nous ne donnerons pas ici.

Les cirques sont une forme caractéristique du relief lunaire. Il en est de très grands, de 250 km de diamètre; de moyens,

d'une centaine de kilomètres de diamètre, dont le rempart surplombe le fond de plusieurs milliers de mètres; le versant intérieur du rempart est plus escarpé que le versant extérieur;

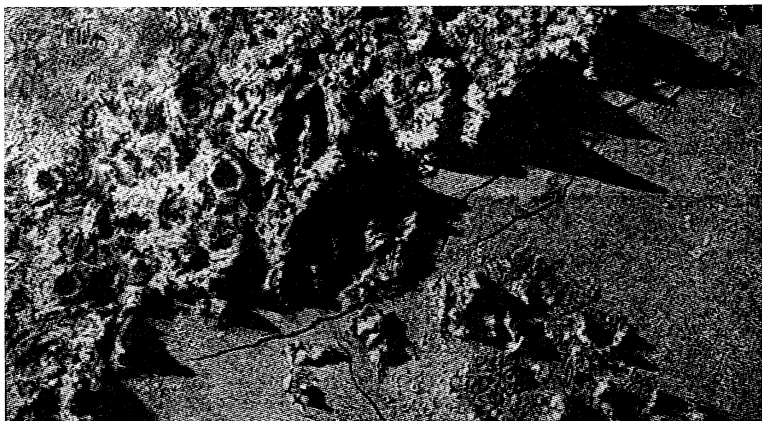


Fig. 120. — Montagnes lunaires.

*La longueur des ombres portées permet de calculer les hauteurs des sommets.
Les crevasses apparaissent nettement sur cette photographie.*

souvent, le centre du cirque est occupé par un piton. Enfin, un très grand nombre de petits cirques, de quelques kilomètres de diamètre, sont répartis sur toute la surface de la Lune.

On observe également, à la surface de la Lune, des sillons,

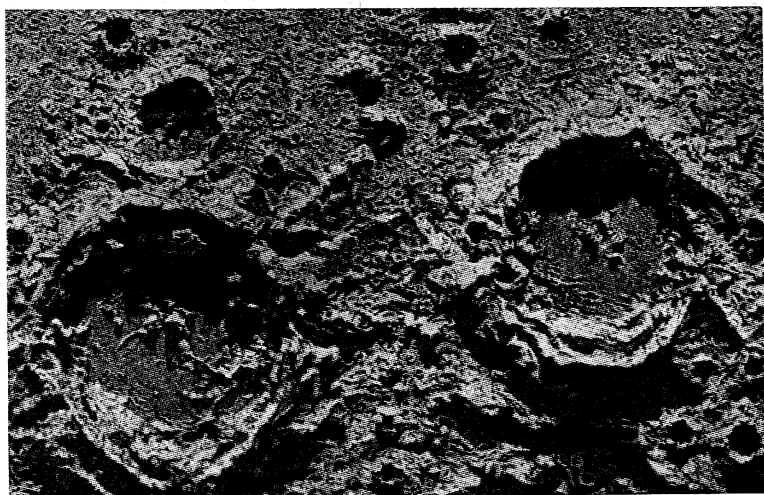


Fig. 121. — Cratères et craterlets.

des rainures ou crevasses, droits ou anguleux, de largeur suffisamment uniforme pour qu'on ne puisse les confondre avec des vallées d'érosion.

On cherche l'origine des cirques dans l'hypothèse du refroidissement assez rapide d'une masse d'abord visqueuse, avec formation de vastes boursouflures en dômes ensuite effondrés. Peut-être, la chute de météorites (voir chap. v), non dissociées par suite de l'absence d'atmosphère, a-t-elle été la cause de certains petits cirques. Les cassures montrent la tendance à la

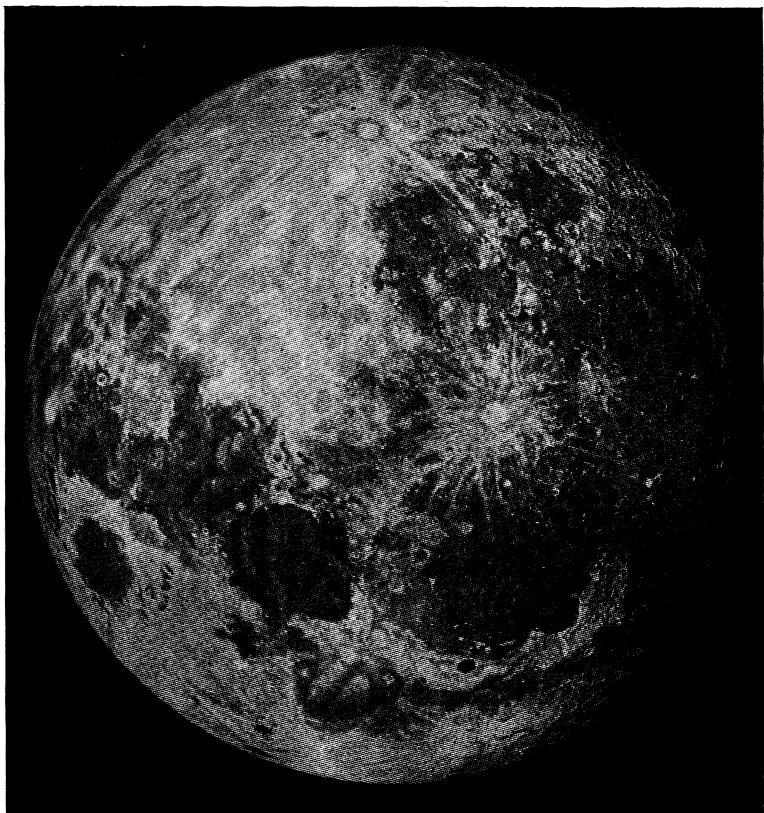


Photo Le Morvan, communiquée par l'Observatoire de Paris.

Fig. 122. — La pleine Lune.

dislocation de l'écorce. Les phénomènes de plissements, si fréquents sur la Terre, se sont peu manifestés.

Le cirque le plus profond (*Newton*) atteint 7 250 m de profondeur; le plus haut sommet (*Mont Huyghens*) atteint 5 500 m

d'altitude. Pour rapprocher ces nombres des cotes du relief terrestre, il faudrait les comparer aux plus grandes profondeurs océaniques (10 790 m) et aux plus hauts sommets (8 882 m). Par rapport aux rayons correspondants, le relief de la Lune est plus accusé que le relief terrestre.

3° La température, à la surface de la Lune, est fort variable. Puisque la Lune tourne sur elle-même en $27\text{ j } \frac{1}{3}$, des points de la Lune restent ensoleillés pendant 13 et 14 jours consécutifs, et sont dans la nuit pendant une durée analogue. L'absence d'atmosphère fait qu'aucune absorption des rayons solaires n'a lieu et que rien ne s'oppose au refroidissement nocturne.

On a pu en conclure que les températures, sur la Lune, varient de $+100^\circ$ au centre de l'hémisphère éclairé à -150° au centre de l'hémisphère obscur. Les roches soumises à ces températures extrêmes s'effritent, ce qui explique l'abondance de formations pulvérulentes à la surface du sol. D'ailleurs, aucun vent ne les soulève : pas de dunes, pas d'obturation des crevasses par la poussière transportée.

En résumé, la Lune est un astre mort. Il sera peut être possible, d'ici quelques années, d'explorer directement notre satellite; les conditions relatives à la température, à l'absence d'atmosphère et d'eau, devront être prises alors en sérieuse considération.

EXERCICES

55. — On lit dans Flaubert (*Salammbô*, ch. xv) : « Le Soleil commençait à descendre et le croissant de la Lune se levait déjà dans l'autre partie du Ciel. »

Dans quels cas peut-on voir le lever d'un croissant de Lune? Peut-il se lever quand le Soleil descend?

56. — Étudier les phases de la Terre, vues de la Lune. Faire l'épure pour un angle de phase de 150° .

Si la Lune, vue de la Terre, est un croissant, la Terre, vue de la Lune, a-t-elle également la forme d'un croissant?

57. — A quelle époque de l'année la pleine Lune atteint-elle la plus grande hauteur dans notre hémisphère? L'ombre d'un arbre vertical, éclairé par la pleine Lune à sa culmination, est-elle plus grande en été qu'en hiver?

58. — En décembre 1951, la déclinaison du Soleil a été inférieure à -23° du 11 au 31. Dans cette période, la déclinaison de la Lune a atteint $+28^\circ$ le 14 et -28° le 28 décembre. Dire laquelle de ces dates correspond à la pleine Lune et à la nouvelle Lune.

3

ÉCLIPSES
DE LUNE

■ 104. **Cône d'ombre de la Terre.** — Soit S le Soleil qui éclaire la Terre T. Un cône circonscrit commun aux deux sphères a pour sommet A. Tout point situé dans la région hachurée de ce cône ne reçoit pas de lumière du Soleil. Cette région porte le nom de **cône d'ombre de la Terre**.

Si nous considérons le second cône circonscrit commun, de sommet B, tout point situé à l'intérieur de ce cône, au-delà de la Terre par rapport au Soleil, mais à l'extérieur du cône d'ombre, le point C par exemple, n'est éclairé que par une partie de la surface solaire. Toute la région ainsi définie s'appelle **pénombre**.

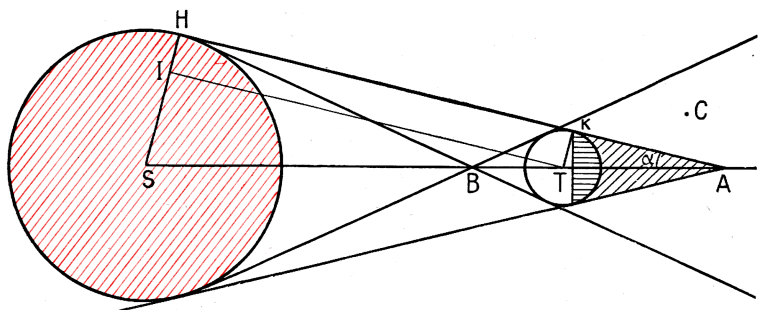


Fig. 123. — Cône d'ombre de la Terre.

1° **Longueur du cône d'ombre.** — Menons de T la parallèle TI à AH (fig. 123). Les triangles rectangles KAT et ITS donnent la relation :

$$\frac{TA}{ST} = \frac{TK}{SI}.$$

Prenons comme unité le rayon terrestre R. On a alors, en valeurs moyennes :

$$ST = 23\,400\,R; \quad TK = R, \quad SI = SH - R = 108\,R.$$

$$\text{d'où :} \quad TA = 23\,400\,R \times \frac{1}{108} \approx 217\,R.$$

Si l'on tient compte de la variation de la distance de la Terre au Soleil, on trouve que la longueur du cône d'ombre est comprise entre 213 R et 221 R.

● **REMARQUE.** — La longueur du cône géométrique que nous avons considéré n'est pas tout à fait confondue avec celle du cône

d'ombre véritable. Des rayons solaires sont absorbés par l'atmosphère terrestre; d'autres sont diffusés, ce qui a pour effet d'allonger le cône d'ombre. Mais d'autres sont réfractés par l'atmosphère, ce qui a pour effet de raccourcir le cône d'ombre. On peut raisonner sur le cône d'ombre géométrique, mais en admettant qu'un peu de lumière du soleil puisse parvenir à l'intérieur de ce cône.

Les calculs faits à partir du cône géométrique, et légèrement corrigés, conduisent à des résultats qui s'accordent avec les observations.

2° Ouverture du cône d'ombre. — Appelons α le demi-angle KAT au sommet du cône d'ombre.

$$\text{On a :} \quad \sin \alpha = \frac{TK}{TA} = \frac{1}{217}.$$

Ceci est une valeur moyenne, qui suffit pour montrer que le sinus peut être confondu avec l'arc exprimé en radians.

On peut dire aussi :

$$\frac{TK}{TA} = \frac{SI}{ST} = \frac{SH - IH}{ST} = \frac{SH}{ST} - \frac{R}{ST}.$$

$$\text{Or, } \frac{SH}{ST} = \sin D \quad (D = \text{demi-diamètre apparent du Soleil})$$

$$\text{et } \frac{R}{ST} = \sin p \quad (p = \text{parallaxe du Soleil})$$

d'où, les angles D et p étant petits :

$$\boxed{\alpha = D - p.}$$

Les tables donnent D , et p pour chaque jour; α est donc déterminé à tout moment.

■ **105. Éclipses de Lune** — *Il y a éclipse de Lune quand la Lune pénètre dans le cône d'ombre de la Terre.*

Nous ne nous occuperons pas des cas où la Lune ne pénètre que dans le cône de pénombre; il n'y a pas alors véritablement d'éclipse mais simple diminution de la luminosité de la Lune.

La Lune cesse alors, en totalité ou en partie, de recevoir les rayons directs du Soleil.

Ce phénomène est possible, puisque la distance de la Terre à la Lune, comprise entre 55 R et 66 R, est inférieure à la longueur du cône d'ombre.

Il ne peut se produire qu'au moment de la pleine lune, car alors le Soleil et la Lune sont en opposition.

Mais il ne se produit pas à toutes les pleines lunes; l'inclinaison

(5°) du plan de l'orbite lunaire par rapport au plan de l'écliptique fait que, dans la plupart des oppositions, la Lune ne rencontre pas le cône d'ombre. Ce n'est que dans le cas où l'opposition se produit au voisinage de la ligne des nœuds qu'une éclipse peut se produire.

Nous allons rechercher :

1° si la Lune peut entrer complètement dans le cône d'ombre de la Terre;

2° pour quelles latitudes de la Lune le phénomène est possible.

■ 106. Diamètre apparent de la section du cône d'ombre à la distance de la Terre à la Lune. — La figure 124 représente, dans le plan de l'écliptique, la section de la Terre et du cône d'ombre par ce plan. Coupons le cône par une sphère de centre T et ayant pour rayon la distance des

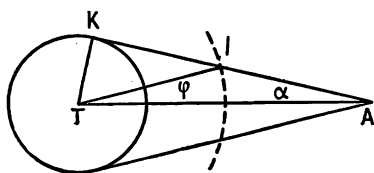


Fig. 124.

centres de la Terre et de la Lune au moment de l'opposition.

Cette distance peut être considérée comme constante pendant le temps assez court où la Lune risque de pénétrer dans le cône d'ombre. Le centre de la Lune va donc se mouvoir sur cette sphère.

Cette sphère coupe le cône d'ombre suivant un cercle dont le demi-diamètre apparent est $\widehat{ITA} = \varphi$, et l'on a :

$$\widehat{KIT} = \varphi + \alpha.$$

Or, l'angle $\widehat{KIT}$ est la parallaxe P de la Lune au moment de l'opposition. On a donc :

$$\varphi = P - \alpha$$

et, en se reportant à la valeur trouvée au N° 104

$$\boxed{\varphi = P + p - D}$$

EXEMPLE. — Le 5 août 1952, il y avait pleine lune à 19 h 40 m.

On avait : $P = 61' 17''$; $p = 9''$; $D = 15' 50''$,

d'où :

$$\varphi = 61' 17'' + 9'' - 15' 50'' = 45' 36''.$$

Le demi-diamètre apparent de la Lune était $16' 40''$.

La Lune pouvait être tout entière dans le cône d'ombre.

L'angle φ , en tenant compte des corrections de réfraction, reste compris entre $38' 23''$ et $46' 33''$. Il est notablement supérieur au demi-diamètre apparent de la Lune.

■ **107. Possibilité d'une éclipse de Lune.** — Figurons la section du cône d'ombre terrestre (fig. 125, I) par un plan *perpendiculaire* au plan de l'écliptique. Soit L le centre de la Lune au moment de l'opposition. L'angle LTA est la latitude céleste λ de la Lune à ce moment. Appelons Δ son demi-diamètre apparent.

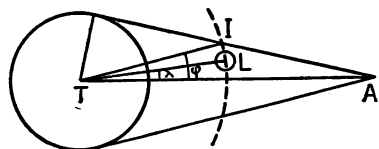


Fig. 125. I.

La figure I montre qu'il y a *éclipse totale* si :

$$|\lambda| + \Delta < \varphi,$$

ou :

$$|\lambda| < \varphi - \Delta.$$

Nous venons de voir que $\varphi - \Delta$ est toujours positif; donc l'inégalité n'est pas impossible.

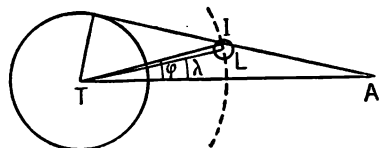


Fig. 125. II.

Dans la figure 125, II, l'éclipse serait *partielle*; la Lune entre dans le cône d'ombre sans y pénétrer tout entière. Elle se produira si :

$$|\lambda| - \Delta < \varphi < |\lambda| + \Delta$$

ce qui donne :

$$\varphi - \Delta < |\lambda| < \varphi + \Delta.$$

Enfin, si l'on a :

$$|\lambda| > \Delta + \varphi$$

il n'y a plus d'éclipse.

Le maximum de $\Delta + \varphi$ est :

$$46'33'' + 16'55'' = 63'28''.$$

Le minimum de $\Delta + \varphi$ est :

$$38'23'' + 14'11'' = 52'34''.$$

De même, $\varphi - \Delta$ est compris entre :

$$46'33'' - 14'11'' \quad \text{et} \quad 38'23'' - 16'55''$$

$$\text{ou} \quad 32'22'' \quad \text{et} \quad 21'28''.$$

On peut dire, en arrondissant ces nombres, que si l'on a, au moment de l'opposition :

$$|\lambda| < 21' : \text{éclipse totale certaine.}$$

$$21' < |\lambda| < 32' : \text{éclipse certaine, totale ou partielle.}$$

$$32' < |\lambda| < 52' : \text{éclipse certaine, partielle.}$$

$$52' < |\lambda| < 63' : \text{éclipse partielle possible.}$$

$$63' < |\lambda| : \text{éclipse impossible.}$$

■ **108. Phases d'une éclipse de Lune.** — Nous avons représenté la section du cône d'ombre à l'endroit où la Lune le traverse (fig. 126). Si l'éclipse est totale, la Lune prendra les aspects

de la partie II de la figure. Le disque lunaire disparaît graduellement, limité par deux arcs de cercle dont la concavité est tournée dans le même sens. A la fin de l'éclipse, le disque lunaire sort de l'ombre en présentant une disposition inverse de la première. La durée du phénomène, depuis le premier contact de la Lune et de l'ombre jusqu'à la sortie complète est de quatre heures; la Lune disparaît complètement pendant deux heures environ.

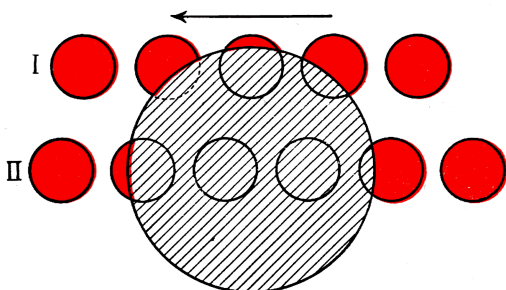


Fig. 126. — Éclipses de Lune.
I, partielle; II, totale.

La flèche indique le sens du déplacement de la Lune.

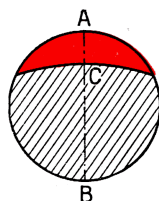


Fig. 127. — Une éclipse partielle de Lune, à son maximum.

Le sens dans lequel le phénomène se produit est indiqué par la flèche : c'est le sens contraire du mouvement diurne. La Lune s'échance par sa gauche, et le dernier contact se fait par la droite de la Lune pour l'observateur terrestre. Ce sens est en effet celui du mouvement de la Lune par rapport au système Terre-Soleil, considéré comme fixe pendant le temps que dure le phénomène.

L'éclipse partielle est représentée par la partie I de la figure. La partie éclipsée présente un maximum. Si, à cet instant, on trace le diamètre commun au cercle d'ombre et à la Lune (fig. 127) la *grandeur* de l'éclipse est le rapport $\frac{BC}{AB}$.

■ 109. **Visibilité d'une éclipse de Lune.** — Une éclipse de Lune est visible, au même instant, de tous les points de la Terre pour lesquels la Lune est au-dessus de l'horizon. Ce phénomène est donc un signal qui pourrait être employé à la détermination des longitudes. Mais l'instant précis de l'entrée de la Lune dans l'ombre s'observe difficilement avec une exactitude suffisante pour être utilisable à cet effet.

Pendant l'éclipse, grâce à la réfraction atmosphérique, la Lune reste éclairée faiblement par une lumière rougeâtre, les rayons rouges étant ceux que l'atmosphère terrestre absorbe le moins.

4

ÉCLIPSES
DE SOLEIL

■ 110. **Cône d'ombre de la Lune.** — Le Soleil éclairant la Lune détermine un cône d'ombre et un cône de pénombre, comme nous l'avons expliqué pour la Terre (fig. 128).

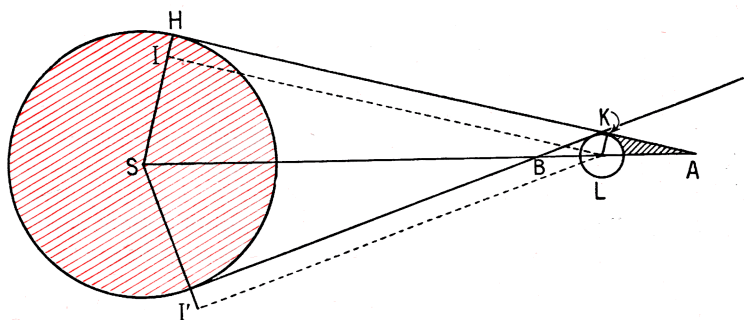


Fig. 128. — Cône d'ombre de la Lune.

1° **Longueur du cône d'ombre.** — La distance du centre du Soleil au centre de la Lune est variable, comme celle du Soleil à la Terre, et suivant la position de la Lune sur son orbite. Mais la distance moyenne est encore 23 400 R.

Prenons, pour rayon du Soleil, 109 R et pour rayon de la Lune $\frac{3}{11}$ R. On peut écrire :

$$\frac{LA}{SL} = \frac{LK}{SI}$$

ou :

$$LA = \frac{23\,400\,R \times \frac{3}{11}}{109 - \frac{3}{11}}$$

ou, d'une façon suffisamment approchée :

$$LA = \frac{23\,400\,R \times 3}{109 \times 11} = 58,5\,R.$$

Un calcul plus précis montrerait que LA varie entre 57 et 59 rayons terrestres.

2° Ouverture du cône d'ombre — En appelant α le demi-angle au sommet du cône d'ombre, on a :

$$\sin \alpha = \frac{LK}{LA} = \frac{SL}{SI} \\ = \frac{109 - \frac{3}{11}}{23\,400} \approx 0,0046.$$

α est voisin de $16'$.

3° Ouverture du cône de pénombre. — Le demi-angle au sommet du cône de pénombre est égal à l'angle SLI' .

En appelant β cet angle, on a :

$$\sin \beta = \frac{SI'}{SL} = \frac{109 + \frac{3}{11}}{23\,400} \approx 0,0046...$$

de sorte que, pratiquement, les points A et B, sommets des deux cônes, sont symétriques par rapport à L.

■ **111. Éclipses de Soleil.** — Il y a **éclipse de Soleil** quand la Terre pénètre dans le cône d'ombre de la Lune, ou même seulement dans le cône de pénombre.

Remarquons d'abord que la longueur du cône d'ombre de la Lune, comprise entre 57 et 59 R, est voisine de la distance de la Terre à la Lune, comprise entre 55 et 66 R.

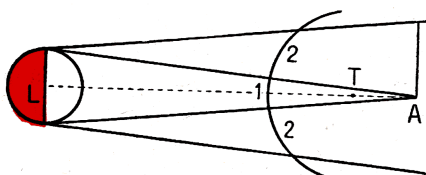


Fig. 129.

A l'époque d'une conjonction, donc à la nouvelle Lune, si les centres des trois astres sont à peu près alignés, la Terre pourra se trouver au voisinage de

la pointe du cône d'ombre. Nous allons préciser par l'étude de trois cas particuliers.

1° Prenons : $LA = 59\text{ R}$ et $LT = 55\text{ R}$ (fig. 129).

Le cône d'ombre de la Lune est coupé par la Terre à une distance de A égale à 5R.

Dans cette figure et dans les suivantes, les proportions entre les rayons de la Terre et la longueur du cône d'ombre n'ont pu être conservées.

La Lune va porter sur la Terre une tache d'ombre circulaire dont le rayon sera sensiblement égal à $\frac{5}{59}$ du rayon de la Lune, soit, en kilomètres :

$$1\,736 \times \frac{5}{59} = 147\text{ km.}$$

C'est le plus grand rayon possible de la tache d'ombre.

Pour un observateur terrestre situé sur cette tache d'ombre, le Soleil cesse d'être visible; il est caché par la Lune. On dit que, pour cet observateur, l'éclipse est **totale**.

Autour de la tache d'ombre s'étend une tache de pénombre. D'après la remarque faite au N° 110, 3°, le rayon du cône de pénombre, en A, est égal au diamètre de la Lune, donc inférieur au rayon terrestre. La Terre tout entière, dans la position considérée, n'est donc pas dans le cône de pénombre, qui va seulement découper sur la Terre une calotte entourant l'ombre.

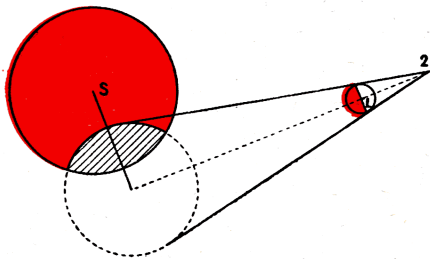


Fig. 130. — Pour un observateur de la zone 2, la lune masque en partie le soleil.

Pour un observateur terrestre situé dans cette région, que nous avons indiqué 2 (fig. 129), le soleil ne sera visible qu'à l'extérieur du cône circonscrit à la Lune et ayant

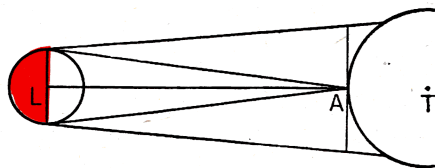


Fig. 131.

pour sommet l'observateur. Pour cet observateur, l'éclipse est **partielle** (fig. 130).

2° Prenons : $LA = 59 R$ et $LT = 60 R$ (fig. 131).

Le sommet du cône d'ombre est juste sur la Terre et l'ombre est réduite à un point. C'est un cas limite. La zone de pénombre entoure ce point; il y aura éclipse partielle pour toute l'étendue de cette zone de pénombre.

3° Prenons : $LA = 57 R$ et $LT = 66 R$ (fig. 132), ce qui est un autre cas limite. On a alors :

$$AT = 9 R.$$

Le rayon du cône de pénombre, en T, est supérieur au diamètre de la Lune de :

$$TP = AT \sin \alpha = 9 R \times 0,0046 \neq 0,04 R.$$

Ce rayon vaut donc :

$$(0,54 + 0,04...)R.$$

Il est donc encore *inférieur* au rayon terrestre, et la Terre n'est pas tout entière dans le cône de pénombre.

Nous distinguerons sur la Terre, dans ce cas, deux zones :

la zone (1), découpée par le cône d'ombre au-delà de son sommet A,

la zone (2), à l'intérieur du cône de pénombre, mais à l'extérieur de (1).

Pour un observateur terrestre situé dans la zone (2), il y a *éclipse partielle*.

Pour un observateur situé dans la zone (1), la Lune se projette

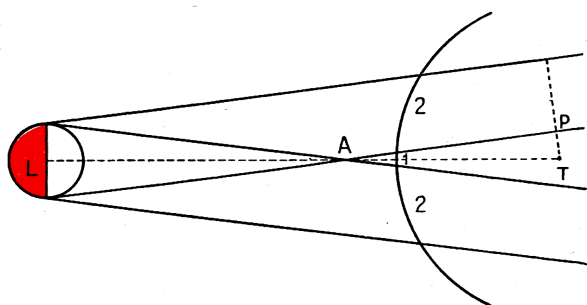


Fig. 132, I.

sur le Soleil; mais le diamètre apparent de la Lune qui, en A, est égal à celui du Soleil, est, en (1), inférieur : la Lune ne peut donc masquer complètement le Soleil, et on verra, autour d'une tache sombre centrale, un bord lumineux, tout autour du Soleil. L'éclipse est dite **annulaire** (fig. 132, II).

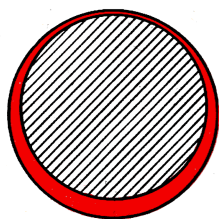


Fig. 132, II.

En résumé, la nature de l'éclipse dépend non seulement de la distance de la Terre à la Lune au moment de l'opposition, mais encore de la place de l'observateur, sur la Terre, la même éclipse étant, au même moment, totale (ou annulaire) dans une région

très limitée et partielle dans une région avoisinant la première. En aucun cas, l'éclipse n'est visible à la fois de tout l'hémisphère éclairé par le Soleil.

■ **112. Possibilité d'une éclipse de Soleil.** — La figure 133 représente les sections du Soleil S et de la Terre T par un plan *perpendiculaire* à l'écliptique. Soit L la position du centre de la Lune au moment de la conjonction. Si nous ne distinguons pas entre les diverses éclipses de Soleil, il est clair qu'il ne peut y avoir une éclipse que si la Lune pénètre dans le cône tangent extérieurement à la Terre et au Soleil.

Ce cône est le cône d'ombre terrestre prolongé vers le Soleil.

Il faut et il suffit pour cela qu'au moment de la conjonction, la latitude céleste λ du centre de la Lune soit inférieure en valeur absolue à la somme de l'angle JTS et du demi-diamètre apparent Δ de la Lune.

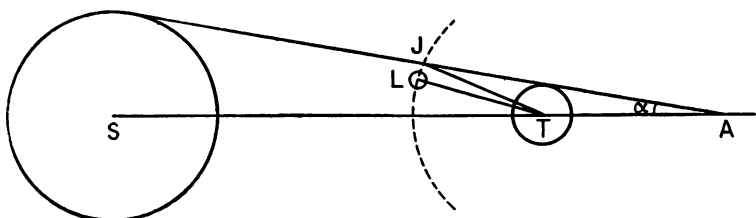


Fig. 133.

On a : $\widehat{\text{JTS}} = \widehat{\text{TJA}} + \widehat{\text{JAS}}.$

L'angle $\widehat{TJA}$ est la parallaxe P de la Lune; l'angle JAS a été calculé au N° 104, 2°; il est égal à $D - p$, D étant le demi-diamètre apparent et p la parallaxe du Soleil.

Nous avons donc, en désignant par ψ l'angle JTS

$$\downarrow = P + D - p.$$

L'éclipse de Soleil se produit donc si l'on a :

$$|\lambda| < \psi + \Delta.$$

La quantité $\psi + \Delta$ varie entre $1^{\circ} 22'$ et $1^{\circ} 35'$.

Il n'y a donc pas d'éclipse si, au moment de la conjonction, la latitude de la Lune dépasse, en valeur absolue, $1^{\circ} 35'$.

Il y en a certainement une si, au même moment, $|\lambda| < 1^{\circ}22'$.

Pour $1^{\circ}22' < |\lambda| < 1^{\circ}35'$, l'éclipse est douteuse, et il faut faire le calcul.

● REMARQUE. — La marge trouvée pour la latitude de la Lune qui rend certaines les éclipses de Soleil est plus grande que celle que nous avons donnée pour les éclipses de Lune. Il était évident, sans calcul, que la section du cône circonscrit extérieurement au Soleil et à la Terre est plus grande entre le Soleil et la Terre qu'au-delà de la Terre. Il en résulte que les éclipses de Soleil sont plus fréquentes que les éclipses de Lune. Mais, en *un lieu déterminé*, on observe plus d'éclipses de Lune que d'éclipses de Soleil.

■ **113. Déplacement de l'ombre portée à la surface de la Terre.** — Supposons que la Lune se meuve dans le plan de l'écliptique et que ce plan soit lui-même confondu avec le plan de l'équateur (fig. 134).

La Lune décrit son orbite dans le sens indiqué par la flèche.

et la tache d'ombre qu'elle porterait sur la Terre décrirait l'équateur de l'Ouest vers l'Est, pendant que la Lune décrirait l'arc JJ' de son orbite.

L'angle JTJ' que nous avons appelé 2ψ (N° 112) vaut à peu près $2^{\circ}30'$; la Lune, qui tourne sur son orbite de 360° en 30 jours

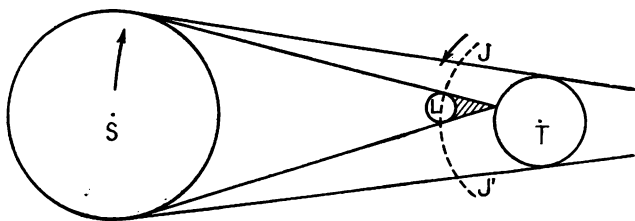


Fig. 134.

environ, soit de 12° par jour, ou $30'$ par heure, le parcourt en 5 heures. L'ombre décrirait donc le demi-équateur terrestre sensiblement en 5 heures. Mais en même temps, le système Soleil-Lune participe au mouvement diurne, qui se fait en sens contraire; l'ombre est alors entraînée de l'Est vers l'Ouest de 15° par heure, soit de 75° , pour les 5 heures envisagées. On se rend compte ainsi que c'est le déplacement de l'ombre de l'Ouest vers l'Est qui l'emporte, et que l'on observe.

Bien entendu, l'ombre ne décrit pas l'équateur comme nous l'avons admis ci-dessus, puisque les trois plans considérés, équateur, écliptique et orbite de la Lune, ne sont pas confondus. Mais le résultat global subsiste : la tache d'ombre décrit une bande de la Terre, de l'Ouest vers l'Est; la durée totale du déplacement ne dépasse jamais 4 h 30.

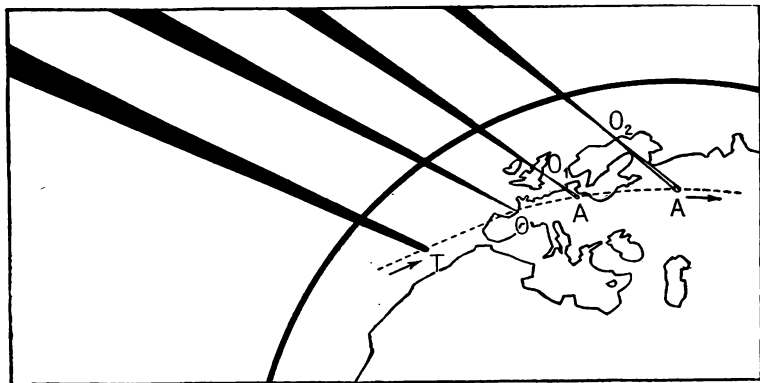


Fig. 135. — Le cône d'ombre de l'éclipse de 1912.

Nous avons représenté (fig. 135) le déplacement sur la Terre de la tache d'ombre, lors de l'éclipse totale de 1912; totale sur l'océan Atlantique, elle atteignit la côte de France près des Sables-d'Olonne, traversa la France un peu au Sud de Paris, devint annulaire à la longitude du Danemark.

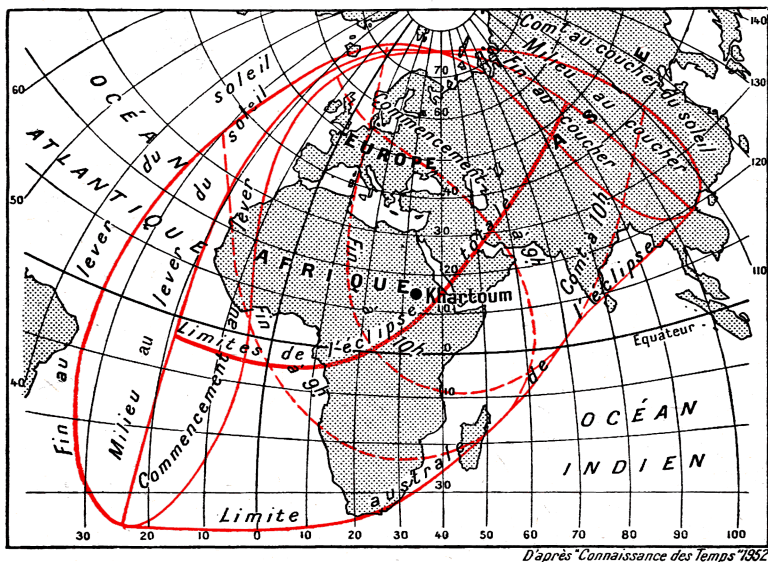


Fig. 136. — Zone de visibilité totale et partielle (éclipse de 1952).

L'étude des positions respectives du Soleil, de la Terre et de la Lune et de leurs mouvements permet de calculer à l'avance, avec une précision remarquable, le déplacement de la tache d'ombre pour chaque éclipse, et d'en déduire la zone de totalité, d'annularité et de visibilité partielle

Nous donnons (fig. 136) la carte correspondant à une éclipse déterminée (zone de totalité et de visibilité partielle) et (fig. 137) les pronostics pour celles des éclipses de Soleil qui seront visibles en Europe dans la seconde moitié du xx^{e} siècle.

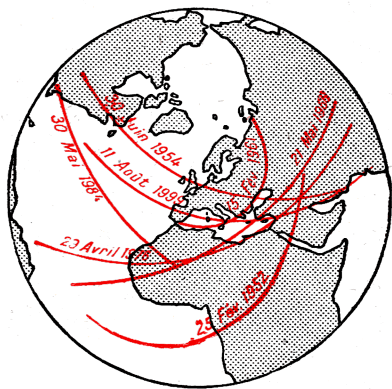


Fig. 137. — Les éclipses visibles en Europe de 1950 à 2000.

Zone de totalité ou d'annularité.

■ **114. Observation d'une éclipse totale.** — L'observation d'une éclipse totale de Soleil présente un grand intérêt. Le phénomène est rare *en un lieu donné* : il n'y en a pas eu visible à Paris, entre 1724 et 1912; il n'y en aura pas avant l'année 2026. Il est de courte durée, la phase de totalité ne dépassant pas 6 minutes.

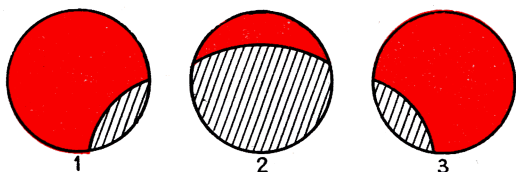


Fig. 138. — Les phases d'une éclipse partielle (pour un observateur de l'hémisphère Nord).

On voit le disque solaire s'échancrer d'abord à droite; le croissant qui subsiste devient de plus en plus mince; il disparaît si l'éclipse est

totale; puis le disque solaire ressort de l'ombre par son côté droit. Dans toutes les parties de ces phases, le croissant est limité par deux arcs de cercles, et non pas par un arc de cercle et un arc d'ellipse comme un croissant de lune.

Tant que l'éclipse est partielle, on voit les taches lumineuses dessinées sur le sol à travers les feuillages, et qui sont d'habitude arrondies, prendre la forme de petits croissants. Une éclipse de Soleil est très spectaculaire; les oiseaux se taisent, les poules rentrent au poulailier, la température s'abaisse. Autrefois, les hommes en étaient épouvantés.

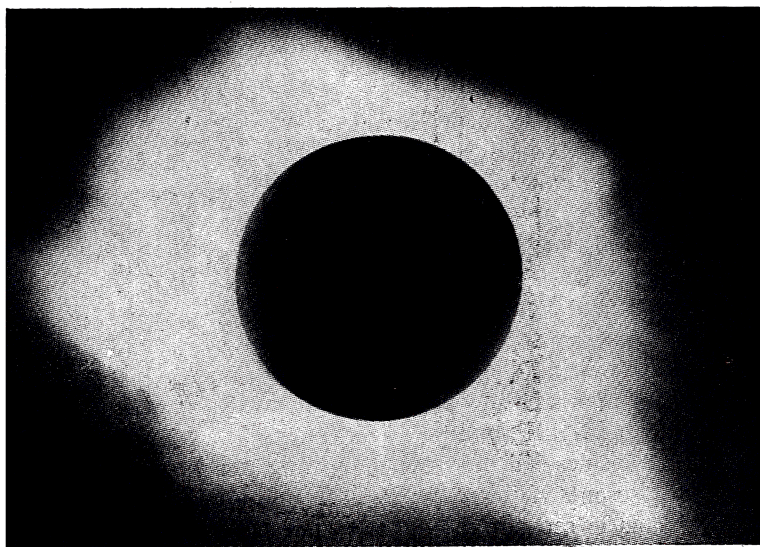


Fig. 139. — Éclipse totale de 1952.

Photo Keystone.

Actuellement, l'observation d'une éclipse totale est suivie avec soin par les astronomes, qui font au besoin des déplacements lointains, avec le matériel nécessaire. Celle de février 1952 a été observée à Khartoum par les astronomes français.

La vérification par l'observation des heures calculées permet de rectifier au besoin les tables de la Lune. La netteté de l'ombre de la Lune sur la Terre et sa dimension montrent qu'aucune réfraction, due à une atmosphère lunaire, n'a modifié la longueur théorique du cône d'ombre. L'apparition des étoiles au moment de l'éclipse totale a permis de vérifier la déviation des rayons lumineux au voisinage du Soleil, effet annoncé par EINSTEIN.

Enfin, pendant longtemps, les éclipses totales ont fourni les seules occasions de voir la couronne solaire (fig. 139). Nous y reviendrons au chapitre VI. C'est au cours d'observations de 4 à 6 minutes chacune, et dont le total, réparti sur un siècle, n'a pas dépassé 2 heures en supposant toutes les éclipses observables, que fut rassemblé l'essentiel de nos connaissances sur la constitution physique du Soleil.

■ **115. Prédiction des éclipses. Le Saros.** — Les Anciens avaient remarqué une périodicité dans le retour des éclipses de Lune, la période étant de 18 ans 11 jours. Cette période, appelée **Saros** par les Chaldéens, leur servait à prédire les éclipses.

Pour les éclipses de Soleil, ils n'avaient rien remarqué d'analogue. La même périodicité existe cependant pour elles; mais ce n'est pas au même lieu, sur la Terre, que sera visible l'éclipse reproduisant celle qui l'a précédée de 18 ans 11 jours; aussi le phénomène est-il resté longtemps inaperçu.

Nous savons qu'une éclipse ne peut se produire que si le Soleil est au voisinage d'un nœud.

Supposons que le Soleil soit au nœud ascendant λ_1 . Il va décrire l'écliptique dans le sens direct, tandis que le nœud rétrograde de façon à parcourir l'écliptique en 18 ans $\frac{2}{3}$. Un calcul simple

(que nous proposons en exercice au n° 60) montre que le Soleil passera de nouveau au nœud ascendant λ_2 avant la fin d'une année,

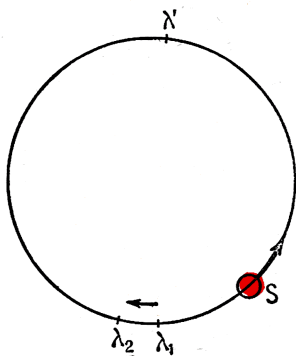


Fig. 140.

soit en 346,6 jours solaires moyens. Au milieu de cette période, il a rencontré le nœud descendant λ' (fig. 140).

C'est pendant la lunaison qui contient ce passage que se produisent les éclipses, parfois à la conjonction et à l'opposition, parfois à deux conjonctions successives, et, dans ce cas, sûrement à l'opposition qui les sépare. Ainsi, autour du passage du Soleil au point λ peuvent se trouver groupées, soit une éclipse de Lune et une de Soleil, soit deux éclipses de Soleil encadrant une éclipse de Lune; exceptionnellement, une seule éclipse qui est alors de Soleil (voir exercices 63 et 64).

Le même phénomène se reproduisant quand le Soleil passe en λ' , les éclipses d'une même année se trouvent donc appartenir à deux périodes séparées par à peu près 6 lunaisons.

Si une période comprenait un nombre entier de lunaisons et un nombre entier de passages du Soleil en λ , les éclipses produites dans cette période se reproduiraient dans la période suivante. Soit N la durée qui sépare deux passages du Soleil au nœud ascendant λ , L la durée d'une lunaison. On a trouvé que :

19 N font 6 585,78 jours

et que : 223 L font 6 585,36 jours.

6 585,5 jours font 18 années juliennes et 11 jours.

Ce résultat, qui se trouve correspondre à un certain nombre d'autres conditions que nous ne pouvons mentionner ici, fait que la période de 18 ans 11 jours permet une bonne prédiction des éclipses, bien qu'elle ne soit pas une certitude; le calcul reste toujours nécessaire.

Voici quelques exemples qui montrent la périodicité des éclipses, et leur répartition dans une année.

Années	J	F	M	A	M	J	J ^t	A	S	O
1924			☾ ☼					☼ ☾ ☼		
+ 18 ans			☾ ☼					☼ ☾ ☼		
1942			☾ ☼					☼ ☾ ☼		
			11j					11j		
1933		●							●	
+ 18 ans		●							●	
1951		●							●	
		11j							11j	

Ce tableau indique les éclipses de Lune (☾), les éclipses partielles de Soleil (☼) et les éclipses totales (ou annulaires) de Soleil (●). Il en ressort nettement les groupes d'éclipses séparées par une moyenne de 6

mois, dans l'année, la répétition de ces éclipses **18 ans** après, avec un recul de date de **11 jours**.

On compte, en moyenne, **71 éclipses** en **18 ans 11 jours**, dont, **28 de Lune** et **43 de Soleil**.

Le Saros peut servir à prédire les éclipses de Lune; il ne peut servir à prédire les éclipses de Soleil *en un lieu donné*; le calcul direct de l'éclipse est nécessaire. Il l'est toujours si l'on veut préciser les éléments de l'éclipse.

La figure 141 montre les zones de totalité de trois éclipses de Soleil dont les dates diffèrent de **18 ans 11 j.**

La région de visibilité s'est déplacée, d'une éclipse à la suivante, de **120°** environ vers l'Ouest. Le Saros comprend en effet une partie fractionnaire de **8 h** environ, soit un tiers de jour, et le déplacement vers l'Ouest correspond à la rotation de la Terre pendant ce temps.

Le Saros a servi aux historiens à fixer certaines dates de l'histoire ancienne. Les éclipses de l'antiquité ont été notées par PTOLÉMÉE, puis par les Arabes. On peut les retrouver dans la suite des éclipses, dressée en remontant d'un Saros à l'autre. On pose ainsi quelques jalons dans la chronologie.

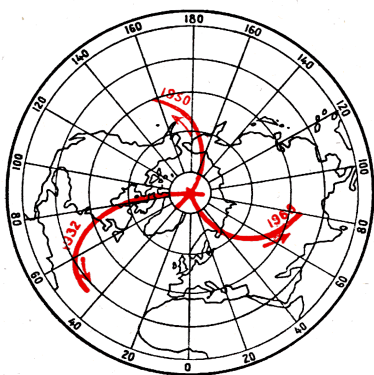


Fig. 141. — Déplacement d'une éclipse de soleil.

Après 1 saros, la zone de totalité a tourné de 120° vers l'Ouest.

LA LUNE : NOMBRES À RETENIR

	VALEURS EXTRÊMES	VALEUR MOYENNE
Diamètre apparent 2Δ . . .	28' à 34'	31'
Parallaxe P	52' à 62'	57'
Distance à la Terre	55 à 66 R	60 R = 380 000 km
Rayon p.		$\rho = 0,272R = 1736\text{km}$
Volume v		$v = \frac{2}{100}$ volume Terre.
Inclinaison de l'orbite. . . .	5° à 5°18'	
Révolution synodique. . . .		29 j $\frac{1}{2}$
Révolution sidérale		27 j $\frac{1}{3}$
Saros.		18 ans 11 j 8 h

◀ LECTURES ▶

■ 116. Influences de la Lune sur la Terre. — 1^o *Les marées.*

— Le mouvement de flux et de reflux de la mer suit si régulièrement le mouvement de la Lune que la relation de cause à effet s'impose. La Lune attire la masse des eaux de l'Océan, causant une dénivellation qui se déplace devant la Lune, avec un retard dû à l'inertie et au frottement, et est la cause de l'onde de marée que nous voyons déferler sur nos côtes. L'action du Soleil s'ajoute à celle de la Lune aux sizygies; elle la contrarie aux quadratures, d'où l'origine des marées de *vive-eau*, aux environs de la pleine Lune et de la nouvelle Lune, et des marées de *morte-eau* aux environs des quartiers.

Cette explication très simple est en réalité compliquée par le fait que, pour un Océan, la marée est un phénomène oscillatoire, et que la période de vibration propre de la masse liquide en mouvement peut, suivant les cas, être harmonisée avec la période d'attraction lunaire ou avec la période solaire. Enfin, des singularités locales sont causées par la forme des côtes, de sorte que l'amplitude des marées et l'heure de la pleine mer sont très variables.

Cependant, on arrive à prévoir, pour un lieu donné, avec une précision de quelques minutes, les heures de pleine mer et de basse mer, et, avec une précision de quelques centimètres, le niveau qui sera atteint à ces moments. Ces prédictions sont importantes pour la navigation et pour la vie sur les côtes.

2^o La Lune et la météorologie. — On peut penser que si la mer est soulevée par l'attraction de la Lune, notre atmosphère doit l'être également.

L'observation, c'est-à-dire l'étude des correspondances des variations barométriques avec la position de la Lune, a été entreprise sans que les conclusions soient bien nettes.

Elle ne le sont pas davantage en ce qui concerne l'influence de la Lune en météorologie. Le dogme de l'influence lunaire a cependant des partisans convaincus, surtout dans les campagnes.

Sans vouloir discuter des règles de prédiction aussi variées que contradictoires, quand elles ne sont pas ornées de réticences qui permettent à leurs auteurs d'avoir toujours raison devant les événements, nous pouvons dire que les longues suites d'observations, enregistrées depuis plus d'un siècle, jour par jour, par les services météorologiques, n'ont pas permis d'établir un lien entre le mouvement de la Lune et les phénomènes météorologiques.

D'ailleurs, la phase de la Lune est la même à la fois sur toute la Terre, tandis qu'une dépression cyclonale peut mettre cinq jours pour se déplacer du Nord de l'Écosse jusqu'au fond de la Baltique, entraînant des variations diverses sur toute la France.

3° *La Lune rousse.* — Pourtant, on ne peut nier que si la Lune brille dans le ciel du mois de mai, il y a des chances pour que les jeunes pousses de vignes ou de pommes de terre soient gelées le matin. On dit que la Lune les a roussies.

Il y a là une concordance indiscutable, mais non une relation de cause à effet. Si la lune brille, c'est que le ciel est sans nuages, et que rien ne s'oppose au refroidissement nocturne. Le même phénomène se produira aussi bien au moment de la nouvelle lune, si le ciel est clair, bien que la Lune ne paraisse pas. Il se produirait aussi au mois de mars dans les mêmes conditions, mais alors la Lune ne roussit pas les jeunes pousses parce que la végétation n'est pas encore partie.

4° *La Lune et la végétation.* — Le nombre des méfaits attribués à la Lune, surtout à la campagne, formerait une longue liste, ainsi que les règles que certains cultivateurs croient devoir suivre pour éviter des catastrophes. Il faut mettre le vin en bouteilles en Lune décroissante, semer les pommes de terre en Lune croissante, etc. Ces règles varient d'ailleurs d'une région à l'autre, résultats, en général, d'observations hâtivement généralisées, et insuffisamment contrôlées.

Il ne s'agit pas de nier systématiquement des faits qui se sont peut être produits, et qui mériteraient une étude approfondie. Mais, jusqu'à présent, la science agronomique, qui a fait des progrès considérables depuis un siècle, n'a pu les homologuer.

Soyons cependant modestes; la Lune n'a peut-être pas révélé toutes ses actions et la sagesse de Hamlet est profonde quand il dit : *« Il y a plus de choses dans le Ciel et sur la Terre que n'en peut contenir notre philosophie. »*

■ 117. *Premières mesures dans le Ciel.* — Sans atteindre à la précision des mesures actuelles, les astronomes grecs avaient su déterminer convenablement, en fonction du rayon terrestre, le rayon ρ de la Lune et sa distance à la Terre; ils ont moins bien réussi avec la distance du Soleil.

1° Le Soleil étant très loin de la Terre, ils admettaient que l'ombre de la Terre est cylindrique.

En observant une éclipse totale de Lune, ils constataient, dans le cas où l'éclipse est centrale, c'est-à-dire quand le centre de la Lune rencontre l'axe de l'ombre, que le temps mis par la Lune pour pénétrer entièrement dans l'ombre est le quart du temps que la Lune passe tout entière dans le cylindre d'ombre. Ils en ont conclu que le diamètre de la Lune est le quart du diamètre de la Terre, soit $\rho = 0,25 R$ (fig. 142).

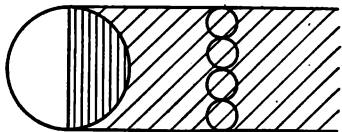


Fig. 142.

La Lune est vue sous un angle de $30'$ environ, ou un demi-degré. Un bâton vertical est vu sous cet angle quand il est à une distance de 120 fois sa longueur. Donc la Lune est à une distance de la Terre égale à 120 fois le diamètre de la Lune, soit $240 \varphi = 60 R$.

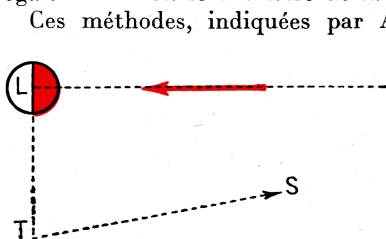


Fig. 143.

HIPPARQUE qui, dans le second siècle avant notre ère, estimait la distance de la Lune à 60 R. Il savait d'ailleurs que ce n'était qu'une distance moyenne, car la variation du diamètre apparent lui était connue.

2° Si l'on considère la Lune à son quartier, la direction du Soleil est perpendiculaire à la droite qui joint les centres de la Lune et de la Terre. On connaît la longueur LT (fig. 143). Si l'on mesure l'angle LTS, on a le moyen d'en déduire les autres côtés du triangle rectangle.

ARISTARQUE a trouvé 87° pour la mesure de cet angle et a conclu que le Soleil est 19 fois plus loin que la Lune. Nous dirions :

$$\widehat{LST} = 3^\circ \quad \text{et} \quad \sin 3^\circ = 0,052 \neq \frac{1}{19}.$$

La difficulté de la mesure précise de cet angle fut cause que ce résultat, manifestement trop petit, fut cependant admis pendant de nombreux siècles.

Nous avons là des exemples des premières tentatives mathématiques pour mesurer les éléments du Ciel les plus proches de nous.

EXERCICES SUR LE CHAPITRE IV

59. — Déterminer l'angle sous lequel, du Soleil, on voit le diamètre de l'orbite lunaire. On prendra 60 R et 23400 R pour distances de la Terre à la Lune et au Soleil.

60. — Le nœud ascendant de la Lune parcourt l'écliptique d'un mouvement rétrograde en 18 ans $\frac{2}{3}$. Le Soleil parcourt l'écliptique dans le sens direct en 1 an (m^t apparent). En déduire l'intervalle de temps qui sépare deux passages successifs du Soleil au nœud ascendant. Donner le résultat : 1° en fraction d'année; 2° en jours solaires moyens.
(On prendra : 1 an = 365,25 j. Réponse : 346 j. s.)

61. — Étant donné l'angle de phase de la Lune, calculer le rapport de la surface du disque lunaire qui paraît lumineuse à la surface totale du disque. Quel doit être l'angle de phase pour que ce rapport soit égal à 0,25?

62. — On relève dans l'annuaire les déclinaisons de la Lune, à minuit :
13 décembre : $27^{\circ}33'$; 14 décembre : 28° ; 15 décembre : $27^{\circ}7'$.

Quelle est la latitude des lieux de la Terre pour lesquels la Lune est restée au-dessus de l'horizon pendant ces deux jours consécutifs?

Même question pour les dates suivantes (3 jours) :

18 juin : — $25^{\circ}51'$; 19 juin : — 28° ; 20 juin : — $28^{\circ}1'$; 21 juin : — $25^{\circ}56'$.

Les dates considérées dans l'un et l'autre cas encadrent-elles une pleine Lune ou une nouvelle Lune?

63. — *Éclipses de Lune.* — Soit θ la longitude céleste de la Lune, comptée à partir d'un nœud, λ sa latitude céleste, i l'inclinaison de l'orbite de la Lune sur le plan de l'écliptique.

1° En construisant l'angle plan du dièdre formé par le plan de l'orbite lunaire et le plan de l'écliptique, établir la relation :

$$\operatorname{tg} \lambda = \sin \theta \operatorname{tg} i.$$

2° En prenant $i = 5^{\circ}8'$ et $\lambda = 1^{\circ}3'28''$ maximum de λ pour qu'une éclipse de Lune soit possible, calculer la valeur correspondante de θ . (On trouve un nombre voisin de 11° .)

3° Montrer, en utilisant le résultat de l'exercice 60, que le Soleil s'écarte du nœud ascendant d'un peu plus de 1 degré par jour. Comme l'intervalle de deux oppositions consécutives est d'environ 29 jours, en déduire qu'il ne peut y avoir éclipse de Lune à deux oppositions successives.

64. — *Éclipses de Soleil.* — 1° En utilisant la relation établie au 1° de l'exercice précédent, prendre $\lambda = 1^{\circ}35'$ maximum de λ pour qu'une éclipse de Soleil soit possible. Avec $i = 5^{\circ}8'$, calculer la valeur correspondante de θ . (On trouve un nombre voisin de 18° .)

2° En utilisant ce résultat, montrer que lors des deux conjonctions qui encadrent le passage du Soleil au nœud, il peut y avoir éclipses de Soleil, mais il ne peut pas y avoir éclipse de Soleil pour trois conjonctions successives.

CHAPITRE V

LE SYSTÈME SOLAIRE

- 1. *Mouvements des planètes.*
- 2. *La gravitation universelle.*
- 3. *Dimensions du système solaire.*
- 4. *Monographie des planètes.*
- 5. *Comètes. Météores et météorites.*

1

MOUVEMENTS DES PLANÈTES

Mars, à sa plus grande puissance, devint splendide et resta ainsi pendant plusieurs semaines. Puis, pendant autant de semaines, devint rétrograde pour reprendre ensuite son cours habituel, parcourant ainsi deux et trois fois la même route. La grandeur de la rétrogradation fut de 20 degrés.

(Tablette K. 2894 du British Museum,
Ninive, v^e siècle av. J.-C.)

■ **118. Les planètes.** — Le mot *planète* signifie en grec : errant, vagabond. Les Anciens connaissaient 5 planètes : Mercure, Vénus, Mars, Jupiter et Saturne (ils y ajoutaient la Lune).

A l'œil nu, une planète ressemble à une étoile; mais elle est dépourvue de ce tremblotement de la lumière que l'on appelle la *scintillation*.

Les planètes se déplacent parmi le champ stellaire, en restant toujours dans le zodiaque, au voisinage de l'écliptique. Mais leur mouvement est tantôt dans le sens direct, comme celui du Soleil, tantôt dans le sens rétrograde. Ces faits, auxquels elles doivent leur nom, sont connus depuis longtemps, comme en fait foi l'inscription chaldéenne que nous citons au début de ce chapitre.

■ 119. **Mouvements apparents des planètes.** — 1^o *Planètes inférieures.* — Mercure et Vénus restent à des distances angulaires du Soleil qui sont limitées; elles ne dépassent pas 29° pour Mercure, 49° pour Vénus.

Mercure est donc toujours près du Soleil dans le Ciel et, de ce fait, difficilement observable. Vénus est visible, tantôt le matin, tantôt le soir, suivant qu'elle précède ou suit le Soleil. Aussi l'appelle-t-on *Étoile du matin* ou *Étoile du soir* suivant les époques où on l'observe.

Nous donnons (fig. 144), le tracé du parcours apparent de Vénus du 1^{er} juillet au 1^{er} novembre 1951; les positions du Soleil sur l'écliptique sont données au début de chacun des mois de juillet, août, septembre, octobre et novembre. Les positions de Vénus, aux mêmes dates, portent les mêmes numéros de 1 à 5. Les ascensions droites sont données en heures.

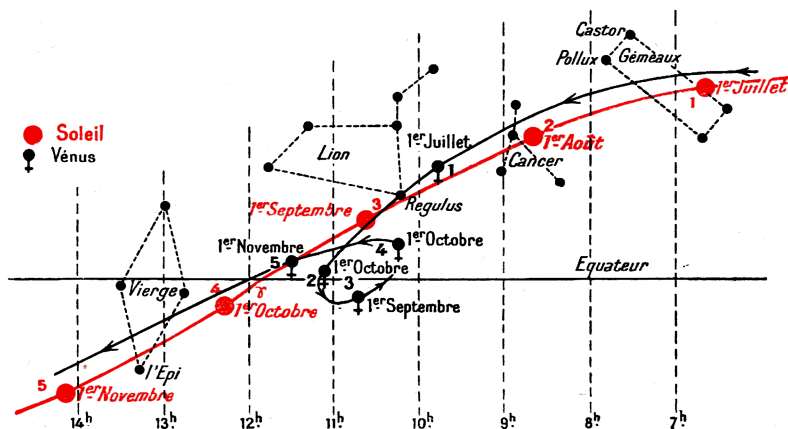


Fig. 144.

On remarque qu'au 1^{er} juillet, Vénus est en retard de 3 heures sur le Soleil (45° environ); elle se couche donc 3 heures après : elle est *étoile du soir*. Au 1^{er} août, le retard est encore de 2 h 30 m. Mais peu de jours après, son ascension droite cesse de croître : c'est une *station* de la planète. Le mouvement rétrograde commence. Dans la position 3 (1^{er} septembre) les ascensions droites du Soleil et de Vénus sont presque égales; elles l'ont été le 3 septembre. Vénus continue son mouvement rétrograde et, au 1^{er} octobre, elle est en avance de 2 heures sur le Soleil. Elle se lève donc avant lui et est devenue *étoile du matin*.

Une nouvelle station a lieu vers cette date; Vénus reprend alors son mouvement dans le même sens que le Soleil. Au 1^{er} novembre (5), elle a trois heures d'avance, soit une distance angulaire de 45° environ.

On remarquera que les trajectoires apparentes de Vénus et du Soleil s'écartent peu.

On a représenté sur le graphique (fig. 145) la variation de la distance angulaire du Soleil et de Vénus au cours de l'année 1951. On y voit que les écarts angulaires les plus grands ont été au début de juin et en fin novembre (49°).

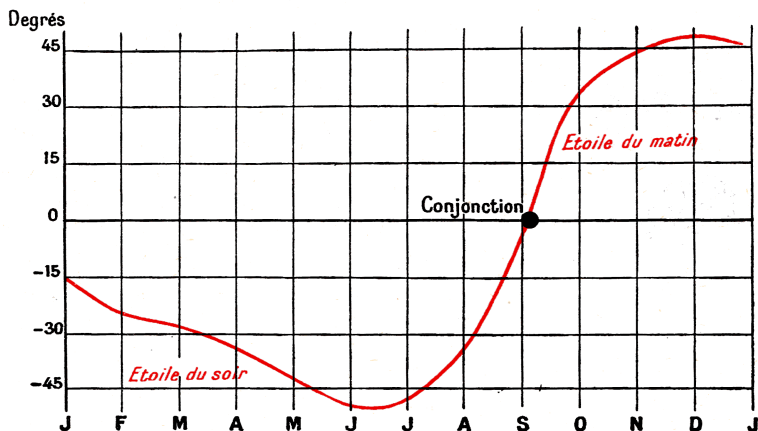


Fig. 145.

L'étude de Mercure donnerait des résultats du même genre, avec des écarts angulaires plus faibles.

L'écart angulaire d'une planète et du Soleil s'appelle l'**élongation** de la planète; le maximum de l'élongation s'appelle la **digression** (49° pour Vénus, 29° pour Mercure).

● On appelle **planètes inférieures** les planètes, telles que Vénus, dont l'élongation reste comprise entre des limites inférieures à 360° .

2° Planètes supérieures. — Mars, Jupiter, Saturne restent également auprès de l'écliptique. Mais leur élongation peut

prendre une valeur quelconque, de 0 à 360° .

Ainsi, en 1951, alors que le Soleil a parcouru l'écliptique, Jupiter a suivi la trajectoire apparente indiquée figure 146. Chacun des numéros indique le rang d'un mois de l'année. Jupiter occupait, le premier

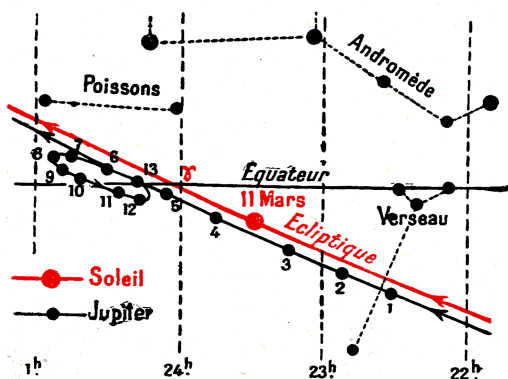


Fig. 146.

jour de ce mois, la position indiquée par le point correspondant.

Les positions du Soleil ne sont plus marquées, car il aurait fallu donner tout le développement de l'écliptique. Mais on comprend que, au cours de l'année, l'élongation ait pu prendre une valeur quelconque.

On voit aussi que le mouvement en sens direct a duré 7 mois, avec une amplitude de 40° , que le mouvement rétrograde a été plus court (4 mois) et qu'après la deuxième station, au 1^{er} décembre, le mouvement direct a repris.

Nous avons figuré la position du Soleil le 11 mars; il avait alors la même ascension droite que Jupiter.

● On appelle **planètes supérieures** les planètes, telles que Jupiter, dont l'élongation peut prendre toutes les valeurs de 0 à 360° .

En plus des planètes déjà citées, on connaît maintenant Uranus, Neptune, Pluton et une quantité de petites planètes.

■ 120. **Système de Ptolémée.** — Les mouvements des planètes anciennement observées ont certainement donné lieu à des hypothèses diverses dont il reste peu de traces avant PTOLÉMÉE (140 après.J.-C.) dont un traité, l'*Almageste*, a été conservé. On ne sait d'ailleurs quel est l'apport personnel de Ptolémée, et la part qui revient aux observateurs antérieurs, tels que HIPPARQUE.

Ptolémée place la Terre fixe au centre de la sphère des fixes, laquelle tourne autour de l'axe du monde en 24 heures. Le Soleil tourne autour de la Terre d'un mouvement circulaire uniforme, en un an. Les variations constatées dans son mouvement apparent seraient dues à ce que la Terre n'est pas exactement au centre du cercle; ce cercle est un excentrique.

Chaque planète décrit un cercle (*épicycle*) dont le centre décrit lui-même un cercle autour de la Terre (*déférent*).

La figure 147, où, pour simplifier, nous avons placé la Terre au centre de l'orbite solaire et des déférents de deux planètes,

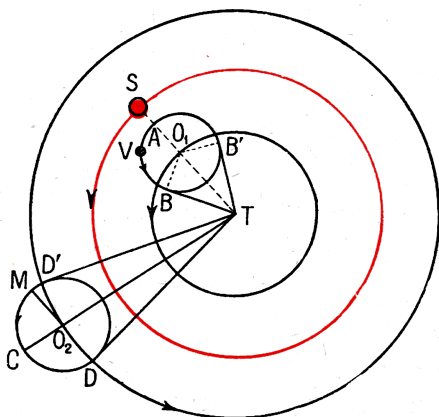


Fig. 147.

permet d'expliquer les mouvements apparents précédemment décrits.

1° Pour une planète *inférieure*, Vénus, par exemple, le centre O_1 de l'épicycle est aligné avec le Soleil et la Terre, et décrit donc le déférent en un an. Vénus décrivant l'épicycle, le déplacement apparent de la planète a lieu dans le sens direct quand elle va de A à B, en sens rétrograde quand elle va de B à B', puis de nouveau dans le sens direct. B et B' correspondent aux **digressions**. On a :

$$\sin O_1TB = \frac{O_1B}{O_1T} = \sin 49^\circ \text{ (digression).}$$

Le rapport des rayons de l'épicycle et du déférent est donc connu.

2° Pour une planète *supérieure*, Mars par exemple, le centre O_2 de l'épicycle décrit le déférent dans le temps que met l'astre à faire le tour du zodiaque. Sur l'épicycle, le rayon O_2M est parallèle à TS. Le déplacement apparent est de sens direct de C à D, il est de sens rétrograde de D à D', puis, à nouveau, de sens direct.

Le but de ce système était la prévision des déplacements apparents des planètes. Il permit de construire des tables de ces mouvements (ou d'améliorer les tables existant déjà). Comme les résultats d'observation ne cadraient pas parfaitement avec la prévision, Ptolémée corrigea son système en rendant certains cercles excentriques. La prédiction des phénomènes planétaires fut alors assurée convenablement, autant que la précision des observations permettait de s'en rendre compte.

Aussi, le système transmis par Ptolémée, et amélioré par lui, apparaît-il comme une conquête remarquable de l'esprit humain, qui sait prévoir les événements au lieu de les subir.

■ **121. Système de Copernic.** — Le système de Ptolémée fut enseigné jusqu'au xvi^e siècle. En 1543 parut le célèbre ouvrage de COPERNIC, *Des Révolutions des Orbes célestes*.

L'idée essentielle de Copernic¹, reprenant celle d'Aristarque, est de placer le Soleil immobile au centre de la sphère des fixes. Chaque planète décrit un cercle autour du Soleil; la Terre elle-même est une planète. Tous les cercles sont sensiblement dans un même plan. Le mouvement apparent du Soleil est dû à la rotation de la Terre sur elle-même, d'une part, et à la translation de la Terre sur son orbite : c'est ce que nous avons expliqué au n° 70. Les mouvements apparents des planètes sont la

1. COPERNIC, chanoine polonais (1473-1543).

conséquence de leur translation sur leur orbite particulière. Tous ces mouvements sont de même sens.

1° Prenons une planète *inférieure*, telle que Vénus. Elle parcourt son orbite avec une vitesse angulaire plus grande que celle de la Terre (fig. 148).

En A, elle est en *conjonction inférieure* avec le Soleil et se projette auprès de lui sur la sphère des fixes. De A à B, elle semble s'écarter du Soleil d'un mouvement rétrograde et arrive en B. Elle reprend de B à C le mouvement apparent de sens direct, et se trouve en C en *conjonction supérieure* avec le Soleil. Le mouvement apparent en sens direct continue jusqu'à ce qu'elle soit en B' où le mouvement devient rétrograde.

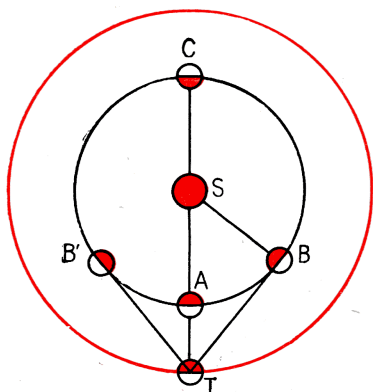


Fig. 148.

L'angle de digression, STB, que l'on peut mesurer, donne le rapport des distances $\frac{SB}{ST}$ du Soleil à Vénus et à la Terre.

$$\frac{SB}{ST} = \sin 49^\circ = 0,7 \text{ (environ).}$$

Mais Vénus est éclairée par le Soleil. Elle doit apparaître de façons différentes au cours de ce mouvement. Si nous la représentons en indiquant la partie éclairée et la partie obscure, dans la conjonction inférieure A, elle est invisible (sauf si elle se projette sur le Soleil); en B, on en aperçoit une moitié (*quartier*) dont la convexité est vers le Soleil; en C, elle est vue entièrement (*pleine Vénus*); en B', c'est encore un *quartier*, à convexité vers le Soleil. Cette planète doit donc avoir des *phases complètes*, comme la Lune (fig. 149).

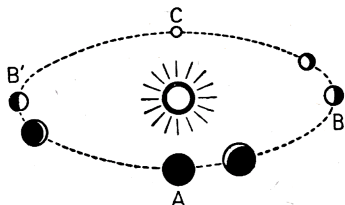


Fig. 149. — Les phases de Vénus, vues de la Terre.

2° Prenons une planète *supérieure*, telle que Mars.

C'est maintenant la Terre qui a une vitesse angulaire supérieure à celle de Mars.

Quand la Terre est en A, Mars et le Soleil paraissent dans des directions opposées sur la sphère des fixes (*opposition*) (fig. 150).

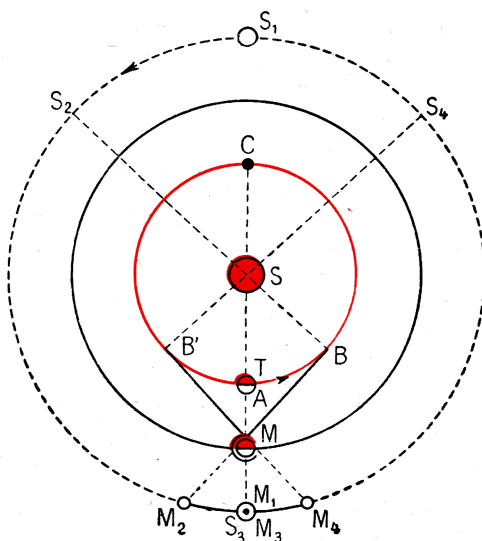


Fig. 150.

La Terre allant de A en B, Mars et le Soleil semblent aller à la rencontre l'un de l'autre, de M_1 en M_2 pour Mars, de S_1 en S_2 pour le Soleil; le mouvement de Mars est rétrograde.

Quand la Terre décrit l'arc BC, le Soleil va de S_2 en S_3 , Mars allant dans le sens direct de M_2 à M_3 ; en C, Mars et le Soleil sont en *conjonction*.

Quand la Terre va de C à B', le mouvement de M continue, sens direct jusqu'en M_4 , le Soleil allant de S_3 à S_4 . Le mouvement de Mars devient alors rétrograde quand la Terre achève le parcours B'A.

Remarquons que la face éclairée de Mars est toujours vue de la Terre; il n'y a pas extinction de la planète, comme pour Vénus. Le maximum d'éclat a lieu quand la Terre est en A (opposition) car c'est alors que la distance de la Terre à Mars est la plus petite; le minimum d'éclat a lieu quand la Terre est en C, (conjonction) la distance Mars-Terre étant augmentée, par rapport à A, de tout le diamètre de l'orbite terrestre.

Entre deux oppositions successives, l'angle TSM a crû de 360° . On peut déterminer la durée qui sépare ces deux oppositions; en en prenant le quart, on aura la date à laquelle l'angle TSM

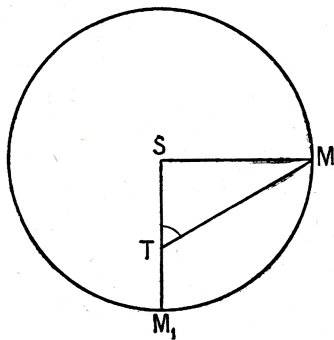


Fig. 151.

est droit (fig. 151). On peut alors mesurer l'angle STM et on en déduit :

$$\frac{SM}{ST} = \operatorname{tg} STM \approx \operatorname{tg} 56^{\circ} \approx 1,5.$$

Ainsi Copernic pouvait-il donner les distances du Soleil aux planètes, en prenant pour unité la distance de la Terre, soit :

Mercure	Vénus	Terre	Mars	Jupiter	Saturne
0,39;	0,72;	1;	1,5;	5,2;	9,6.

Les idées de Copernic furent vivement combattues. Il ne pouvait les défendre, étant mort l'année de la publication de son ouvrage. Les hommes ne renoncent pas facilement à se prendre pour le centre du Monde. Un observateur minutieux, le Danois TYCHO-BRAHÉ (1546-1601), n'eût pas de peine à montrer des différences entre les résultats calculés d'après les mouvements décrits par Copernic et les faits observés. Il accumula les mesures angulaires précises, faites avant l'invention des lunettes. Ce sont ces observations soigneusement notées pendant des années que son élève Képler utilisera.

■ 122. **Lois de Képler.** — Observateur aussi précis que son maître, KÉPLER, astronome wurtembergeois (1571-1630) disposa de ses propres observations et de la masse de documents laissés par Tycho-Brahé. Il sut discipliner une imagination très vive et la soumettre au contrôle des faits, aidé en cela par ses qualités de calculateur.

Il s'attacha à préciser l'orbite de Mars. Déjà, en 1596, il a montré que le plan de cette orbite contient le Soleil mais n'est pas confondu avec le plan de l'écliptique. En 1609, il aboutit aux deux premières des lois qu'il étendit aux autres planètes, et qui rendent son nom immortel.

Première loi ou loi des orbites. — Les planètes décrivent des ellipses dont le soleil occupe un foyer.

Les excentricités de ces ellipses sont faibles : $\frac{1}{140}$ pour Vénus, $\frac{1}{60}$ pour la Terre, $\frac{1}{21}$ pour Jupiter.... Elles sont plus importantes pour Mercure ($\frac{1}{5}$) et pour Mars ($\frac{1}{11}$).

Le grand axe de l'orbite est déterminé par le point où la

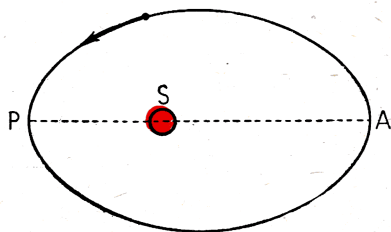


Fig. 152.

planète est le plus près du Soleil (*périhélie* P) et par le point où elle est le plus loin du Soleil (*aphélie* A) (fig. 152).

Deuxième loi ou loi des aires. — Le rayon vecteur qui joint le Soleil à la planète balaie des aires égales en des temps égaux.

Nous avons déjà énoncé ces deux lois à propos du mouvement de la Terre.

Après de longues années de calcul, Képler découvrit enfin, en 1618, sa troisième loi.

Troisième loi ou loi des révolutions. — Les carrés des temps mis par les planètes à parcourir leur orbite (durées des révolutions) sont proportionnels aux cubes des grands axes de ces orbites.

En désignant par T et T' les durées des révolutions respectives de la Terre et d'une planète, par a et a' les longueurs de leur demi-grand-axe, on a :

$$\frac{T^2}{T'^2} = \frac{a^3}{a'^3}.$$

T et T' sont des grandeurs mesurables par observations. La détermination de a entraîne donc celle de a' et réciproquement.

■ 123. **Comparaison des systèmes de Ptolémée et de Copernic.** — Le système de Ptolémée a permis de prévoir, avec une approximation suffisante, pendant 15 siècles, les phénomènes planétaires. Le système de Copernic les prédit aussi bien, mais pas mieux, tant que Képler n'eût pas remplacé les cercles, même excentrés par Copernic, par des ellipses.

Cependant, le système de Copernic a marqué un progrès considérable sur celui de Ptolémée.

1° Pour suivre les faits observés, Ptolémée est obligé de modifier son système pour chaque planète, en multipliant au besoin les épicycles. Le système de Copernic montre pour la première fois un ensemble harmonieux du système solaire.

2° Aucun calcul de distances ne pouvait résulter du système de Ptolémée; le système de Copernic donne les rapports des distances à l'intérieur du système solaire.

3° Dès que GALILÉE fut, en 1610, en mesure d'observer à l'aide de la lunette, qu'il venait de construire, il découvre les phases de Vénus. Dans le système de Ptolémée, Vénus, toujours entre la Terre et le Soleil, ne pouvait apparaître que comme un croissant, et s'éteindre deux fois par révolution. Dans le système

de Copernic, les phases sont complètes : leur observation prouve la révolution autour du Soleil.

De même, le maximum d'éclat pour Mars ou pour Jupiter, s'observe au moment de l'opposition. C'est une évidence dans le système de Copernic; c'est inexplicable dans le système de Ptolémée.

4° Une théorie vaut par la richesse de ses conséquences. Pendant 15 siècles, celle de Ptolémée, à part les prédictions auxquelles elle était destinée, n'a rien engendré qui marquât un progrès dans la connaissance du Ciel.

Celle de Copernic fut le point de départ de la plus riche moisson scientifique : les lois de Képler et les observations de Galilée ont préparé la loi de Newton et tout le développement de la mécanique céleste. Ce mouvement d'idées, joint au perfectionnement des appareils d'observation, procura pendant trois siècles à l'Astronomie des méthodes de travail efficaces et des découvertes admirables.

5° La répercussion de la théorie de Copernic dépasse l'Astronomie. *L'Homme n'est plus le centre du Monde*; il n'est plus la créature privilégiée autour de laquelle tous les astres tournent. Sa Terre n'est qu'une planète comme les autres, ni la plus grosse, ni la plus petite; elle a un satellite comme d'autres planètes en ont. Sa curiosité en sera excitée, car il cherchera des semblables ailleurs. Il pourra, suivant son tempérament, en tirer une leçon d'humilité, ou, au contraire, devant la beauté des résultats obtenus, concevoir une confiance exaltante en la valeur de l'intelligence humaine.

◀ LECTURE ▶

■ 124. **La capture de Mars.** — Képler avait déterminé une orbite de la Terre qui donnait une bonne concordance avec le mouvement observé. C'était un cercle, dans lequel le Soleil était placé à une distance du centre égale aux $18/1000$ du rayon. Ce cercle était parcouru par la Terre suivant la loi des aires.

Possédant une bonne orbite terrestre, il s'attaqua à celle de Mars. Il put placer convenablement des positions voisines du périhélie et de l'aphélie, et essaya le cercle ayant pour diamètre l'axe déterminé par ces deux positions. Il chercha alors à placer les autres positions de Mars et calcula l'écart des positions observées par rapport à ce cercle. Il trouva en certains points des écarts de 8 minutes. « La divine bonté, écrit-il, nous a donné en Tycho un observateur si fidèle qu'une erreur de 8 minutes est inacceptable. »

Les points qu'il détermine sont systématiquement à l'intérieur du cercle essayé. Képler conçoit que la trajectoire doit avoir une forme ovale. Il pense à l'ellipse et en essaie une, assez aplatie, dont le Soleil n'occupait pas un foyer. Cet essai lui donnant encore des écarts, il prend une ellipse intermédiaire entre le cercle et celle qu'il avait essayée : « Par simple chance, dit-il, le Soleil se trouva être à son foyer. » La grande découverte était faite; tous les calculs ultérieurs réussirent magnifiquement. « Mars était devenu prisonnier, et, content de cette capitulation, se rendit de bonne grâce et ne fit plus d'efforts pour s'échapper. »

Képler, au sujet de cette capture, parle de sa « simple chance ». En fait, il a eu plusieurs chances.

D'abord, de s'être occupé de Mars, plutôt que de Vénus. L'excentricité de Vénus est $\frac{1}{140}$; celle de Mars est $\frac{1}{11}$. Avec Vénus, il n'aurait pas plus soupçonné l'ellipse qu'il ne l'avait soupçonnée pour la Terre.

Ensuite, de pouvoir tenir compte d'erreurs de l'ordre de 8 minutes. Si les observations de Tycho-Brahé avaient pu porter sur des secondes, les perturbations de Mars eussent masqué la trajectoire simple et sans doute découragé Képler.

Il en eut une autre plus tard, quand, par des calculs laborieux, il cherchait la loi des révolutions. En 1614, l'Écossais NEPER publiait la première table de logarithmes; son emploi facilita singulièrement les calculs de Képler, qui aboutirent en 1618. Il put alors construire les tables dites rodolphines (du nom de son protecteur, l'archiduc Rodolphe). Publiées en 1626, ces tables sont mémorables, comme les premières qui aient été calculées sur les véritables hypothèses des mouvements célestes. L'état de l'astronomie, au temps de Képler, ne lui permettait pas d'approcher davantage de la vérité.

Mais ces chances ne suffisent pas pour expliquer le génie de Képler; il faut voir en lui l'association rare d'une imagination débordante et de la plus parfaite soumission aux faits.

(D'après Montucla, *Histoire des Mathématiques* (1758);

M. d'Ocagne, *Hommes et Choses de Science*, Vuibert édit;

P. Couderc, *Les Etapes de l'Astronomie*, Presses universitaires édit.)

2

LA GRAVITATION
UNIVERSELLE

■ **125. La mécanique avant Newton.** — Entre 1600 et 1610, Galilée et Torricelli étudiaient à Padoue la chute des corps. Ils avaient déterminé la trajectoire parabolique d'un corps lancé dans le vide.

En 1629, DESCARTES avait énoncé le *principe de l'inertie* :

→ Un corps sur lequel n'agit aucune force se meut d'un mouvement rectiligne uniforme, ou reste en repos.

Ce principe est conforme à la proportionnalité des forces et des accélérations que nous écrivons maintenant sous la forme vectorielle :

$$\vec{F} = m\gamma.$$

■ **126. Problème de Newton.** — *Les planètes se déplaçant sur leurs orbites en suivant les lois de Képler, déterminer une force pouvant produire ces mouvements.*

Nous ne traiterons pas cette question avec des orbites elliptiques, car seuls les mouvements circulaires sont au programme de mécanique de cette classe. Nous raisonnerons donc sur des mouvements circulaires. Le raisonnement sur les orbites elliptiques sera réservé pour les études ultérieures de mathématiques.

1° L'orbite est parcourue suivant la loi des aires. L'aire du secteur parcouru par unité de temps est donc constante; si ω est son angle au centre, on aura :

$$\omega r^2 = k$$

ou :
$$\omega = \frac{k}{r^2}.$$

Le mouvement est uniforme.

2° Dans un mouvement circulaire uniforme, l'accélération est dirigée vers le centre et égale à :

$$\gamma = \omega^2 r.$$

avec :
$$\omega = \frac{2\pi}{T},$$

T étant la durée de la révolution.

D'où :
$$\gamma = \frac{4\pi^2 r}{T^2}.$$

3° Appliquons la troisième loi de Képler :

$$\frac{T^2}{r^3} = C, \quad C \text{ étant une constante pour toutes les planètes.}$$

On a alors, en remplaçant T^2 par Cr^3 :

$$\gamma = \frac{4\pi^2 r}{Cr^3} = \frac{4\pi^2}{Cr^2}.$$

$$\text{D'où :} \quad F = m\gamma = \frac{4\pi^2 m}{Cr^2}. \quad (1)$$

Ainsi la force qui agit sur la planète est proportionnelle à sa masse et inversement proportionnelle au carré du rayon.

En raisonnant sur l'ellipse, on démontre, et nous admettrons que la force passe non par le centre de l'ellipse, mais par le foyer où se trouve le Soleil.

NEWTON avait énoncé ce principe :

{ Si un point matériel A exerce une force sur un point B, inversement, le point B exerce sur A une force directement opposée.

C'est le principe de l'*égalité de l'action et de la réaction*.

Aussi, a-t-il modifié la formule (1) en y faisant entrer la masse M du Soleil, et écrit :

$$F = K \frac{Mm}{r^2} \quad (2)$$

remplaçant ainsi $\frac{4\pi^2}{C}$ par KM.

■ **127. Gravitation universelle.** — Newton eut alors l'idée géniale que cette attraction mutuelle du Soleil et de la planète était un cas particulier d'un phénomène universel et put énoncer, en 1686, dans son ouvrage, *Des principes mathématiques de la philosophie naturelle* :

{ Deux corps quelconques s'attirent par des forces directement opposées, proportionnelles à leurs masses, et inversement proportionnelles au carré de leur distance.

C'est la loi connue sous le nom de *gravitation universelle*, la pesanteur étant un cas particulier de cette loi.

■ **128. Vérification.** — 1° La loi de Newton a été vérifiée par CAVENDISH (1708) dans une expérience de laboratoire, en soumettant deux petites masses, aux extrémités du levier d'une balance de torsion, à l'action de deux grosses masses de plomb fixes. L'action des masses de plomb fit dévier les petites masses.

On peut en déduire la valeur du coefficient K , dite *constante de la gravitation*.

On admet actuellement, en unités C. G. S. :

$$K = 6,67 \times 10^{-8}.$$

2° Vérifions la loi de Newton en comparant l'accélération de la Lune à l'accélération de la pesanteur sur la Terre.

On a, pour la Lune :

$$\gamma = \omega^2 \times 60R.$$

La révolution de la Lune se fait en 27 j 8 h ou :

$$3\,600\text{ s} \times (27 \times 24 + 8) = 3600 \times 656\text{ s}.$$

Nous prendrons :

$$\omega = \frac{2\pi}{3\,600 \times 656} \quad \text{et} \quad R = \frac{20\,000\,000}{\pi} \text{ (mètres)}$$

$$\text{d'où :} \quad \gamma = \frac{4\pi^2}{3\,600^2 \times 656^2} \times 60 \times \frac{20 \cdot 10^6}{\pi} = 0,0027$$

en mètres par seconde à la distance $60 R$ du centre de la Terre. L'accélération g de la pesanteur, à la surface de la Terre, est, en m/secondes, égale à **9,78**, à l'équateur (distance R du centre de la Terre).

On doit donc avoir :

$$g \times R^2 = \gamma \times (60 R)^2 \quad \text{ou :} \quad g = 3\,600 \gamma.$$

On trouve :

$$0,0027 \times 3\,600 = 9,72.$$

ce qui est un résultat excellent, car nous n'avons pris qu'une distance moyenne de la Terre à la Lune et une durée moyenne de la révolution de la Lune.

Ainsi, pour la première fois, les phénomènes célestes sont rattachés à la physique terrestre, donnant ainsi l'idée de lois universelles.

REMARQUE. — Newton avait établi que l'attraction de la Terre sur un point matériel extérieur était la même que si toute la masse de la planète était concentrée en son centre de gravité.

Il créait ainsi, à mesure de ses besoins, les méthodes nouvelles de calcul qui lui permettaient de surmonter les difficultés qui se présentaient.

■ **129. Conséquences des lois de Newton.** — 1° Newton put appliquer la loi de gravitation à de nombreux phénomènes connus et inexpliqués à son époque :

les irrégularités du mouvement de la Lune sont dues à l'attrac-

tion du Soleil, variable suivant la position de la Lune sur son orbite;

le phénomène des marées est dû à l'action simultanée de la Lune et du Soleil sur les masses océaniques.

2° Il prédit l'aplatissement de la Terre; nous avons vu que la vérification en fut faite avec certitude au XVIII^e siècle; mais Newton, sans attendre cette vérification, en avait déduit que l'action simultanée du Soleil et de la Lune sur le renflement équatorial terrestre était la cause de la *précession des équinoxes*.

3° Prenant le problème inverse, Newton se demanda quelle orbite serait parcourue par une masse mobile m , attirée par une masse fixe M en raison inverse du carré de la distance, et lancée avec une vitesse initiale non nulle V_0 faisant un angle donné θ , ni nul, ni plat, avec la droite AB qui joint les positions initiales des deux masses (fig. 153).

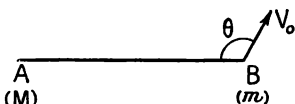


Fig. 153.

Ce problème, qui est traité entièrement dans la classe de mathématiques spéciales, conduit aux conclusions suivantes :

L'orbite de la masse m est une *conique*, dont le point A, fixe, est un foyer; le plan de la conique est déterminé par les vecteurs $\overrightarrow{AB}$ et $\overrightarrow{V_0}$. La nature de cette conique dépend uniquement de la grandeur (et non de la direction) de la vitesse initiale. Pour une valeur particulière de V_0 que nous appellerons V_p , le mouvement est *parabolique*.

Si $V_0 < V_p$, l'orbite est *elliptique*.

Si $V_0 > V_p$, l'orbite est *hyperbolique*.

Dans ce dernier cas, l'orbite ne comprend que la branche d'hyperbole dont la concavité contient le foyer A, centre d'attraction.

Dans tous les cas, les orbites sont décrites suivant la *loi des aires*; dans le cas de l'orbite elliptique, la troisième loi de Képler est vérifiée par le mouvement obtenu.

Ainsi, la loi de Newton a permis de prévoir l'existence d'orbites paraboliques et hyperboliques dont Képler n'avait pas l'idée : nous les retrouverons dans l'étude des comètes.

4° Les satellites artificiels récemment créés (Sputnik, Explorateur) se déplacent en confirmant la loi de Newton.

Quand nous aurons dit que Newton inventa le télescope, qu'il révéla la décomposition de la lumière en éléments de longueurs d'onde différentes, préparant ainsi l'analyse spectrale, qu'il créa le calcul que nous appelons aujourd'hui *différentiel*, et améliora sur de nombreux points les méthodes de

l'algèbre, on se rendra compte de l'influence que ce puissant génie a exercée sur le développement scientifique.

■ **130. Les perturbations.** — La loi de Newton s'applique à deux corps isolés dans l'espace. Mais le Soleil et une planète ne sont pas isolés; toutes les autres planètes exercent sur eux l'attraction newtonienne, qui n'est pas toujours négligeable, et qui, dans certains cas, modifie l'orbite théorique.

● On appelle **perturbations d'une planète** les écarts entre le mouvement réel de cette planète et le mouvement qu'elle suivrait si elle était soumise à la seule attraction du Soleil.

Les perturbations observées ont pu être calculées par la loi d'attraction, appliquée à la planète la plus voisine. Ce calcul est le triomphe de la *mécanique céleste*, dont le développement est le plus beau monument scientifique du XVIII^e siècle; LAPLACE, qui en fut l'auteur le plus illustre, a pu ainsi étudier l'action perturbatrice réciproque des deux plus grosses planètes : Jupiter et Saturne; les longitudes de ces planètes peuvent être modifiées de 20' pour Jupiter et de 50' pour Saturne. Les autres perturbations planétaires sont beaucoup moins importantes. Nous verrons, à propos d'Uranus, le succès le plus spectaculaire du calcul des perturbations.

■ **131. Masses des planètes.** — Nous avons établi, d'après les lois de Képler, deux expressions de la force d'attraction :

$$(1) \quad F = \frac{4\pi^2 m}{Cr^2} \quad \text{avec} \quad C = \frac{T^2}{r^3}$$

et (2) $F = K \frac{Mm}{r^2}$ avec $K =$ constante de gravitation.

En égalant ces deux expressions, on trouve :

$$\frac{4\pi^2}{C} = KM.$$

Ainsi, la connaissance du mouvement d'une planète permet de calculer la masse M du Soleil. Le mouvement d'un satellite autour de sa planète permet aussi bien d'en déduire la masse de la planète.

On a trouvé,

pour le Soleil : $M = 2 \times 10^{27}$ tonnes

et pour la Terre : $m = 6 \times 10^{21}$ tonnes.

Comme les volumes sont connus, on peut en déduire la densité moyenne D . On trouve, par rapport à l'eau :

Soleil : $D = 1,41$

Terre : $D = 5,52$.

3

DIMENSIONS
DU SYSTÈME SOLAIRE

■ 132. **Révolution synodique des planètes.** — On appelle **révolution synodique** d'une planète l'intervalle moyen de temps nécessaire pour que la planète et la terre reprennent la même position par rapport au Soleil.

Pour une planète inférieure, c'est l'intervalle de temps qui sépare deux conjonctions successives de même nom (fig. 154).

Pour une planète supérieure, c'est l'intervalle de temps qui sépare deux oppositions successives (fig. 155).

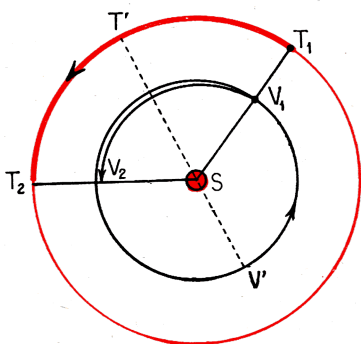


Fig. 154.

Révolution synodique de Vénus.

Quand la Terre est allée de T_1 à T_2 , Vénus a parcouru son orbite, plus l'arc V_1V_2 .

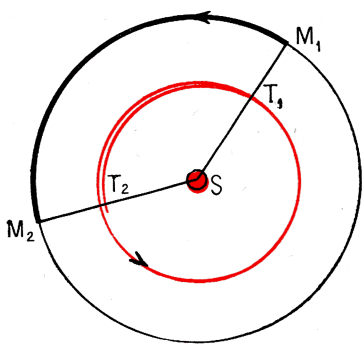


Fig. 155.

Révolution synodique de Mars.

Quand Mars est allé de M_1 à M_2 , la Terre a parcouru son orbite, plus l'arc T_1T_2 .

REMARQUE. — Dans la position T' (milieu de $T_1 T_2$) et V' , Vénus et le Soleil sont encore en conjonction, mais c'est une conjonction supérieure, au lieu que les deux conjonctions considérées en T_1 et T_2 sont deux conjonctions inférieures.

Les durées des révolutions synodiques, pour chaque planète peuvent résulter directement de l'observation.

■ 133. **Révolution sidérale.** — On appelle **révolution sidérale** d'une planète le temps qu'elle met à faire un tour complet de son orbite.

La révolution sidérale se déduit de la révolution synodique par un calcul analogue à celui que nous avons fait pour la Lune. Appelons s la révolution sidérale, σ la révolution synodique, d'une planète, t la révolution sidérale de la Terre.

On trouve, pour une planète inférieure (comme pour la Lune) :

$$\boxed{\frac{1}{s} = \frac{1}{\sigma} + \frac{1}{t}} \quad \text{ou :} \quad \boxed{s = \frac{\sigma t}{t + \sigma}}$$

Pour une planète supérieure, c'est la Terre qui parcourt 360° de plus que la planète pendant la révolution synodique de la planète. On en déduit :

$$\boxed{\frac{1}{s} = \frac{1}{t} - \frac{1}{\sigma}} \quad \text{ou} \quad \boxed{s = \frac{\sigma t}{\sigma - t}}$$

EXEMPLES. — 1° Pour Vénus, $\sigma = 583,9$; $t = 365,25$.

$$s = \frac{583,9 \times 365,25}{949,15} = 224,6 \text{ (jours solaires moyens)}$$

2° Pour Saturne, $\sigma = 378,09$; $t = 365,25$

$$s = \frac{378,09 \times 365,25}{12,84}$$

On trouve : $\frac{378,09}{12,84} = 29 + \frac{573}{1\,284}$

d'où : $s = 29 \text{ ans} + \frac{365,25 \times 573}{1\,284} \text{ j.}$
 $= 29 \text{ ans } 163 \text{ j.}$

Ces résultats ne sont qu'approchés; pour un calcul plus précis, il faudrait prendre $t = 365,25\,636$.

On remarquera combien peuvent être différentes les durées de l'une et de l'autre révolution.

■ 134. Les distances planétaires. — Les révolutions synodiques étant observées, les révolutions sidérales calculées, l'application de la troisième loi de Képler donne les distances relatives des planètes au Soleil, si l'on prend pour unité le demi-grand axe de l'orbite terrestre. Les longueurs des demi-grands axes des planètes sont :

Mercure;	Vénus;	Terre;	Mars;	Jupiter;	Saturne;	Uranus;	Neptune;	Pluton.
0,39	0,72	1	1,52	5,2	9,55	19,22	30,11	39,6
<u>pl. inférieures</u>			<u>planètes supérieures</u>					

Les dimensions du système planétaire seront donc bien connues si l'on détermine l'une d'elles.

Dans l'étude du système solaire, on prend pour unité de longueur une valeur approchée, dont nous ne pouvons donner ici la définition précise, de la distance moyenne de la Terre au Soleil. On l'appelle l'*unité astronomique de longueur* (UA).

■ 135. **Détermination de la parallaxe du Soleil.** — 1° Nous avons indiqué comment on a déterminé la parallaxe de la Lune, par une véritable opération de géodésie (n° 91).

Pour le Soleil, la méthode n'est plus applicable. L'angle à déterminer est trop petit; les bords du Soleil sont difficiles à observer; l'influence de la réfraction ne peut se calculer avec une précision suffisante. On a donc cherché d'autres méthodes.

2° Utilisation de la troisième loi de Képler. — Les distances de toutes les planètes au Soleil seront connues si l'on détermine l'une d'elles, ou si l'on connaît la distance d'une planète à la Terre, dans une position déterminée. On choisit, à cette effet, l'une des planètes qui se rapprochent le plus de la Terre.

Le premier essai de ce genre a été fait au XVII^e siècle avec Mars. Cette planète est, à son opposition, à une distance de la Terre égale à 0,52 UA. La planète a été observée en même temps à Cayenne par RICHER et à Paris par CASSINI et PICARD. On en a déduit la première détermination correcte, bien qu'insuffisamment approchée, de la parallaxe solaire, soit 9".

Actuellement, on se sert de la petite planète *Eros*, découverte en 1898; son orbite est très excentrique, et au moment du périhélie, Eros est seulement à 0,13 UA de la Terre (fig. 156).

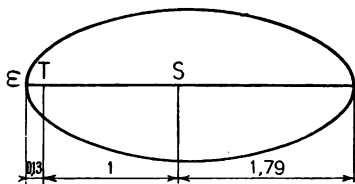


Fig. 156.

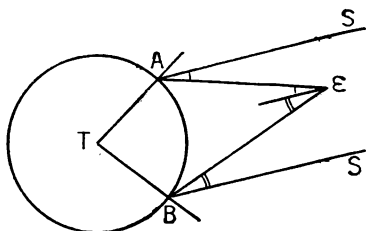


Fig. 157.

De deux observatoires A et B, on vise Eros et la même étoile S. Les directions AS et BS sont parallèles (fig. 157); la somme des distances angulaires d'Eros à S, vues de A, puis de B, donne l'angle A ϵ B. Il suffit, pour mesurer ces distances angulaires, de prendre, de A et de B, au même moment, une photographie d'Eros, sur le champ stellaire. Les deux photographies obtenues, réduites à la même échelle, sont superposables quant aux étoiles; mais les deux images d'Eros sont alors distinctes. C'est une mesure sur les clichés obtenus qui permet de déterminer les distances angulaires cherchées, et par suite l'angle A ϵ B. Le calcul de la parallaxe horizontale d'Eros s'en déduit (comme nous l'avons fait pour la Lune) et par suite la distance 0,13 UA et enfin UA.

Les observations ont été faites en 1900 et en 1930; les positions favorables se reproduisent tous les 30 ans.

3° Passages de Vénus. — Au XVIII^e siècle, HALLEY a essayé de tirer parti des passages de Vénus devant le Soleil, ces passages étant vus de deux stations différentes. Nous donnons une idée de cette méthode par l'exercice 68. Elle a été appliquée en 1761 et 1769. Mais les passages de Vénus, sont rares; le prochain n'aura lieu qu'en 2004, et les résultats obtenus sont moins précis que ceux qui proviennent du calcul avec Eros.

4° Emploi de la vitesse de la lumière. — Nous verrons au n° 141 comment l'observation des satellites de Jupiter a permis de déterminer la vitesse de la lumière.

Inversement, la vitesse de la lumière étant déterminée par une méthode physique, l'observation des éclipses des satellites de Jupiter permet d'en déduire le diamètre de l'orbite terrestre (n° 141).

Les diverses méthodes employées ont donné des résultats concordants; on accepte actuellement les nombres suivants :

Parallaxe horizontale du Soleil : 8",80
 Distance moyenne de la Terre au Soleil :
 $23\,400\,R = 149\,500\,000\text{ km}$
 $UA = 149\,504\,000.$
 (R = rayon équatorial de la Terre.)

EXERCICES

65. — Sachant que la durée de la révolution de la Terre est 365,25 j et celle de Mars 687 j, évaluer le demi-grand axe de l'orbite de Mars, en prenant pour unité le demi-grand axe de l'orbite terrestre.

66. — Même question pour Mercure, dont la révolution est de 88 j.

67. — En prenant pour unité le demi-grand axe de l'orbite terrestre, le demi-grand axe de l'orbite de Jupiter est 5,2. Calculer, en années sidérales, la durée de la révolution sidérale de Jupiter.

68. — *Parallaxe du Soleil par le passage de Vénus.* — Nous supposons qu'à une conjonction inférieure, les centres T de la Terre, V de Vénus, S du Soleil, sont alignés. Deux observateurs terrestres sont l'un en A, l'autre en B, aux extrémités d'un diamètre terrestre perpendiculaire au plan de l'orbite de Vénus. On a (3^e loi de Képler) :

$$\frac{TV}{VS} = \frac{1 - 0,72}{0,72} = \frac{7}{18}.$$

1° L'observateur A voit Vénus se projeter en *a* sur le soleil; au même instant, l'observateur B voit la planète se projeter en *b*. Soit 2ω l'angle ASB et 2α l'angle aTb. Établir la relation :

$$\frac{7}{18} = \frac{\omega}{\alpha} \quad (\omega \text{ et } \alpha \text{ en secondes d'arc}).$$

2° Les deux observateurs ont, au même instant, photographié le disque solaire et la tache faite par Vénus sur ce disque. Le rapprochement des deux photographies permet de déterminer la distance angulaire des deux taches. On trouve $\alpha = 23",4$. En déduire ω .

4

MONOGRAPHIES
DES PLANÈTES

■ **136. Éléments des planètes.** — Le tableau dressé page 165 donne les éléments des grosses planètes. Nous devons nous y reporter pour chacune d'elles.

En ce qui concerne les distances approximatives des planètes au Soleil, l'astronome prussien Bode a donné en 1772 pour les six planètes qu'il connaissait, une règle permettant de retrouver ces distances.

On écrit les nombres :

0; 3; 6; 12; 24; 48; 96,....

formant, à partir du second, une progression géométrique de raison 2.

On leur ajoute 4, ce qui donne :

4; 7; 10; 16; 28; 52; 100....

et on divise par 10. On trouve ainsi :

0,4; 0,7; 1; 1,6; 2,8; 5,2; 10....

Les quatre premiers nombres donnent à peu près les distances de Mercure, de Vénus, de la Terre et de Mars. Le cinquième ne donnait rien; le sixième et le septième concordent à peu près avec les distances de Jupiter et de Saturne.

Cette « loi de Bode » a donné lieu, comme nous le verrons plus loin, à des coïncidences curieuses.

■ **137. Mercure.** — Quand Mercure est visible à l'œil nu, c'est-à-dire au moment de sa plus grande digression, il a l'aspect d'une étoile de première grandeur. Visible soit le matin, soit le soir, il ne s'écarte pas du Soleil de plus de 28° ; l'observation en est gênée par le rayonnement solaire.

Il semble présenter toujours la même face au Soleil (à part un mouvement de *libration* de $\pm 24^{\circ}$); par suite, la durée de sa rotation est la même que celle de sa révolution sidérale (88 j). L'un des hémisphères de Mercure est calciné (300°); l'autre est très froid. Si Mercure a une atmosphère, elle est très ténue. En somme, c'est un astre aussi mort que notre Lune, dont il a à peu près la grosseur.

Les phases de Mercure sont visibles à la lunette.

Une anomalie dans le mouvement du périhélie de Mercure a fait rechercher une planète infra-mercurielle. Les recherches ont été vaines. La

ÉLÉMENTS DU SYSTÈME SOLAIRE

NOMS et signes	ORBITE			RÉVOLUTION		ROTATION		DIAMÈTRE T = 1	MASSE T = 1	SATELLITES
	a	i	e	synodique	sidérale	durée	aplatisse ^t			
Mercure ☿	T = 4 0,39	7°	0,2	416 j	88 j	88 j	0	0,37	0,056	
Vénus ♀	0,72	3°24'	0,007	584 j	225 j	225 j	0	0,966	0,817	
Terre ♂	1	0	0,017	—	—	23 h 56 mn	4/297	1	1	1
Mars ♂	1,52	1°51'	0,093	780 j	1 an 322 j	24 h 37 mn	1/190	0,54	0,108	2
Petites planètes 2,1 à 4,2				3 à 8 ans						
Jupiter ♃	5,2	1°49'	0,048	399 j	11 ans 315 j	9 h 53 mn ± 3 mn.	1/15	11,14	318	12
Saturne ♄	9,55	2°30'	0,056	378,09 j	29 ans 167 j	10 h 44 mn	1/10	9,4	95	10 + anneau
Uranus ♅	19,2	0°46'	0,046	369,66 j	84 ans 7 j	10 h 42 mn	?	4,0	14,58	5
Neptune ♆	30,1	1°47'	0,009	367,49 j	164 ans 280 j	15 h 48 mn	?	4,3	17,26	2
Pluton ♇	39,5	17°8'	0,25	366,69 j	248 ans 157 j	?	?	0,46	0,1 (?)	
Soleil ☉	—	—	—	—	—	25 à 29 j	0	109	333432	
Lune ☾	0,00255 ou 60,26 R	5°8'	0,055	29,52	27,33 j	27,33 j	0	0,272	0,0123	

• Les jours sont des jours solaires moyens. Les années sont des années juliennes de 365,25 j.
a = demi-grand axe; i = inclinaison de l'orbite sur l'écliptique; e = excentricité.

théorie de la relativité a permis d'expliquer ce déplacement du périhélie : ce fut une des premières confirmations de cette théorie, due à EINSTEIN (1915), qui, depuis, s'est révélée si féconde.

■ **138. Vénus.** — C'est la plus belle des planètes, que l'on aperçoit le soir après le coucher du Soleil, ou le matin, avant son lever. Sa plus grande digression est 49° ; elle est donc facilement observable. Ses phases peuvent être suivies avec une lunette modeste; Galilée les découvrit avec sa première lunette.

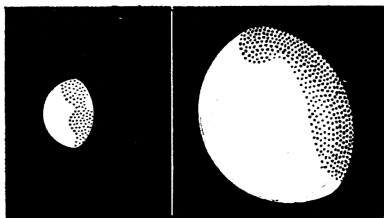


Fig. 158.

Sur cette figure, Mercure à gauche et Vénus à droite sont dessinés avec le même grossissement, dans la même phase.

Nous avons donné (fig. 149) l'explication sommaire

de ces phases. Rappelons que la conjonction inférieure, correspondant à la « Nouvelle Vénus » se fait beaucoup plus près de la Terre que la conjonction supérieure, correspondant à la « Pleine Vénus ». Aussi, le diamètre apparent de Vénus est-il le plus petit quand l'astre est le mieux éclairé pour nous. Nous représentons ci-dessous ces aspects, avec des diamètres proportionnés aux diamètres apparents, qui varient de $10''$ à $60''$. Ce sont les aspects de Vénus en avance sur le Soleil, donc de l'*Étoile du matin*. Ils se reproduisent ensuite dans l'ordre inverse, Vénus

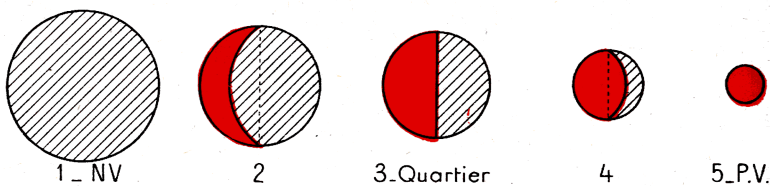


Fig. 159. — Les phases de Vénus.

étant devenue *Étoile du soir*. La durée totale des phases est celle d'une révolution synodique, soit 584 j.

Ce que l'on voit de Vénus est surtout une couche de nuages qui l'entourent, aussi sa rotation est difficile à observer; elle est restée longtemps douteuse. D'après des travaux récents, il semble bien que Vénus présente, comme Mercure, toujours la même face au Soleil, et que sa rotation est donc égale à sa révolution sidérale.

Vénus a une atmosphère, qui illumine par diffraction les cornes du croissant. Cette atmosphère est formée surtout de gaz carbonique, ce qui peut permettre la vie végétale, mais pas la vie animale. Nous pouvons imaginer Vénus couverte de plantes vertes qui absorberont peu à peu le gaz carbonique et rejetteront l'oxygène, préparant ainsi la voie à une vie animale future.

■ 139. Mars. — Le diamètre apparent de Mars varie de 4" à 27", correspondant aux distances extrêmes de cette planète à la Terre. Mars est visible à l'œil nu et présente un aspect rougeâtre. Il tourne sur lui-même en 24 h 37 mn; son axe fait un angle de 25° avec la perpendiculaire au plan de son orbite. Les caractéristiques de Mars sont donc voisines de celles de la Terre. Son diamètre n'est guère que la moitié de celui de la Terre.

Ses phases sont incomplètes, comme pour toutes les planètes supérieures.

On observe à sa surface des calottes glaciaires, qui s'étendent ou diminuent suivant les saisons, de vastes espaces désertiques, des étendues à coloration variable suivant les saisons et qui pourraient être des zones de végétation. L'illusion des fameux *canaux* est définitivement condamnée (fig. 160).

L'atmosphère de Mars, qui existe, est très raréfiée; elle est surtout formée d'azote, de gaz carbonique et d'un peu de vapeur d'eau.

Mars a deux satellites, *Phobos* et *Deïmos* (l'Épouvante et la Terreur), qui tournent autour de Mars l'un en 8 heures, l'autre en 30 heures. De sorte que dans une nuit de Mars, on voit toutes les phases de l'« Épouvante » et une partie importante de celles de la « Terreur ». Mais ces deux satellites sont très petits : 58 et 16 km de diamètre.

La question de la possibilité de la vie sur Mars est encore controversée.

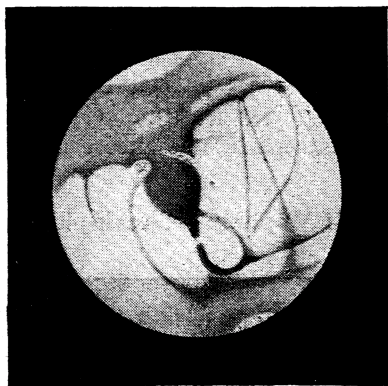


Fig. 160.
Mars observé le 13 juin 1905.

Dessin de l'abbé Moreux, observatoire de
Bourges.

■ 140. **Les petites planètes.** — Le cinquième nombre, 2,8, de la suite de Bode ne correspondait à aucune planète connue. En 1801, on découvrit une petite planète, **Cérès**, dont les éléments furent calculés par GAUSS¹; son demi-grand axe mesurait 2,67. Les découvertes se succédèrent; en 1891, on cataloguait déjà 322 petites planètes. Depuis, par les procédés photographiques, leur nombre s'est accru et dépasse actuellement 1 500.

Ce sont de petits astres; le plus gros, Cérès, n'a que 770 kilomètres de diamètre. La moyenne de leur diamètre est 30 kilomètres. Leurs orbites sont rassemblées en une sorte d'anneau dont le bord intérieur est à 1,76 du Soleil et le bord extérieur à 4,25. Quelques-uns ont une trajectoire très excentrique, et c'est ainsi que **Eros**, découvert en 1898, a pu servir à la triangulation qui permet de déterminer la parallaxe du Soleil. Il n'est d'ailleurs pas le plus excentrique, et l'on pense à refaire cette mesure avec un autre astéroïde encore mieux placé.

■ 141. **Jupiter.** — C'est la plus grosse planète. Son volume est 1 380

fois environ celui de la Terre. Son diamètre apparent varie de 30" à 50". Elle rivalise d'éclat avec Vénus. Elle tourne en 9 h 53 mn autour de son axe; la rapidité de cette rotation explique son aplatissement sensible, de 1/15.

En réalité, la rotation de Jupiter n'est pas simple; elle varie de 9 h 50 mn à l'équateur, à 9 h 56 mn près des pôles. C'est que l'on n'aperçoit au télescope qu'une couche nuageuse, qui apparaît

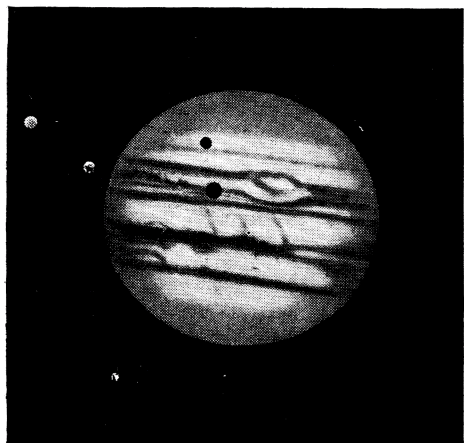


Fig. 161.

Jupiter et ses quatre plus gros satellites.

Dessin de G. Renaudot,
Bulletin de la Société Astronomique.

sous forme de bandes foncées, parallèles à l'équateur, et de taches, plus ou moins persistantes. La *tache rouge*, découverte

1. GAUSS, célèbre mathématicien et physicien allemand (1777-1855).

par Huyghens est seule durable : on ignore à quoi elle est due.

L'atmosphère semble constituée par du gaz ammoniac, probablement à l'état solide ou pulvérulent et du méthane avec de l'azote et de l'hydrogène. La température y est certainement très basse, de l'ordre de -135° .

Galilée avait découvert 4 satellites de Jupiter, voyant ainsi (en 1610), un système analogue à celui de Copernic. C'est en observant, à l'observatoire de Paris, les éclipses de ces satellites que RøMER, en 1676, découvrit la vitesse de la lumière.

Ces éclipses, qui se reproduisent plusieurs fois par nuit, peuvent être calculées à l'avance de façon précise. Elles sont utilisées par les marins et les explorateurs pour connaître l'heure du premier méridien.

En les observant, Rømer constata que si le Soleil est en opposition avec Jupiter, la Terre étant en T_1 , l'éclipse a 8 minutes

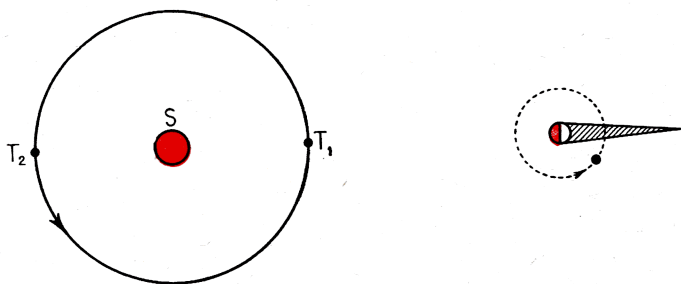


Fig. 162.

d'avance sur l'instant calculé; en conjonction, la Terre étant en T_2 , l'éclipse elle a 8 minutes de retard. Il en conclut que la lumière met 16 minutes pour parcourir un diamètre T_1T_2 de l'orbite terrestre.

En prenant $ST = 150\,000\,000$ km, on en déduit :

$$v = \frac{150\,000\,000}{8 \times 60} = 312\,500 \text{ km/sec.}$$

Actuellement, on détermine la vitesse de la lumière par des procédés physiques, et on admet 299 780 km/sec. Inversement, l'observation précise des éclipses des satellites de Jupiter donne alors un moyen de déterminer le diamètre de l'orbite terrestre.

Les quatre satellites sont assez gros pour être bien observables. La figure 163 les montre, comparés à Mercure et à la Lune. Le plus gros révèle des calottes glaciaires, comme Mars,

et tourne sur lui-même en 7 jours, dans le même temps qu'il tourne autour de Jupiter.

Depuis 1892 plusieurs autres satellites ont été découverts. En

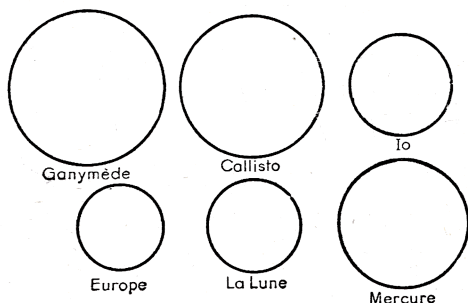


Fig. 163. — Grosseur comparée des quatre plus gros satellites de Jupiter, de la Lune et de Mercure.

1938, on en connaissait 7 autres, mais beaucoup plus petits. Un douzième a été découvert en 1951.

■ 142. **Saturne.** — Le diamètre apparent de Saturne varie de 15" à 20". Cette planète est encore visible à l'œil nu.

Sa rotation se fait en 10 h 14 mn autour d'un axe qui passe par son centre et fait 27° avec la perpendiculaire à l'orbite. L'aplatissement est sensible.

Si son volume représente celui de $(9,4)^3 = 830$ Terres (environ), sa masse n'est que 95 fois celle de la Terre, de sorte que sa densité est faible, inférieure à 1.

Comme pour Jupiter, on en voit surtout des nuages sombres ou clairs de gaz ammoniac en neige et de méthane probablement liquide, ainsi que d'azote.

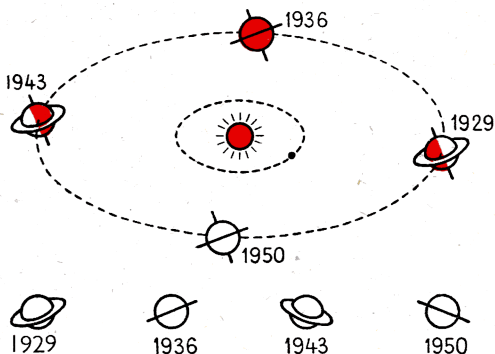
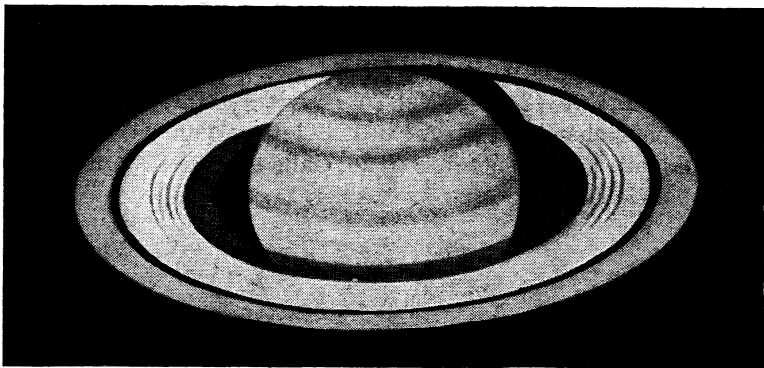
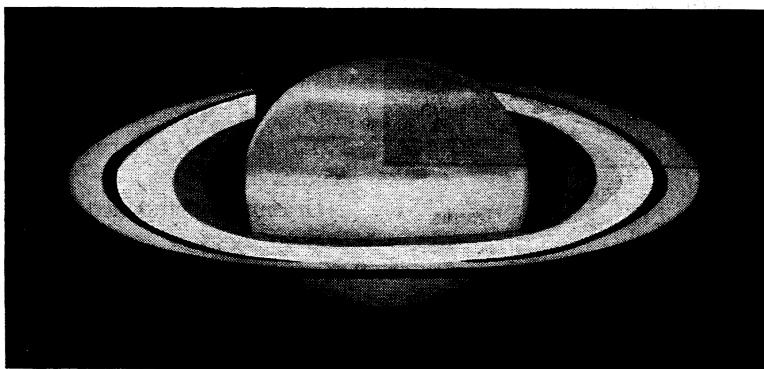
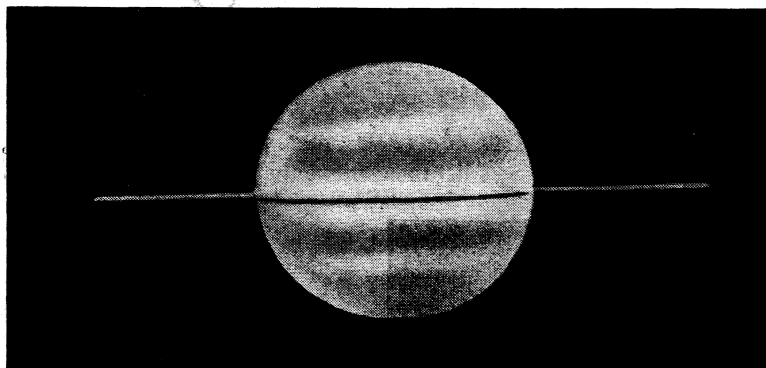


Fig. 164. — Les phases de Saturne, et les aspects successifs pris par l'anneau au cours d'une révolution sidérale.

Saturne a 10 satellites dont le plus gros est de la taille de Mercure. Mais ce qui caractérise Saturne, c'est la présence d'un **anneau**, ou plutôt d'un système d'anneaux situés dans le plan de son équateur. On distingue un anneau extérieur, un peu sombre,

séparé par un mince intervalle d'un anneau brillant; enfin, l'**anneau de crêpe**, à la fois sombre et transparent.

On a de bonnes raisons de penser que l'anneau est composé d'une multitude de minuscules satellites ou de blocs de



Clichés Société Astronomique.

Fig. 165. — Trois aspects télescopiques de Saturne.
1^o Le 27 septembre 1907. — 2^o Le 11 octobre 1910. — 3^o Les divisions
de l'anneau de Saturne.

neige. L'aspect de cet anneau varie d'ailleurs pour nous, par suite de l'obliquité de l'axe de Saturne sur l'écliptique. Il peut n'être visible que par sa tranche.

On remarquera l'ombre portée par Saturne sur son anneau.

■ **143. Uranus.** — La planète Uranus a été découverte par **HERSHEL** en 1781. Sa distance moyenne au Soleil, **19,2**, est encore assez voisine du nombre suivant de la suite de **Bode**, qui est **19,6**.



Fig. 166.

Aspect télescopique d'Uranus.

Son diamètre apparent est très faible : **4"** ; elle est à peine visible à l'œil nu. Elle est difficile à observer, aussi sa rotation a été longtemps douteuse. On peut maintenant dire qu'elle tourne sur elle-même, dans le sens rétrograde, en 11 heures, ce qui explique un aplatissement accusé.

Uranus a cinq satellites.

Comme leurs orbites forment avec l'écliptique un angle de **98°**, leur mouvement paraît rétrograde.

■ **144. Neptune.** — Les perturbations du mouvement d'Uranus avaient amené les astronomes à penser qu'elles étaient causées par une planète plus lointaine.

LE VERRIER¹, après de longs calculs, pénibles et compliqués, indiqua quels devaient être les éléments de la planète perturbatrice, et donna la position qu'elle devait occuper dans le Ciel. Le 18 septembre 1846, **Le Verrier** écrivit à **Galle**, astronome à Berlin, pour chercher la planète dans telle région du Ciel qu'il lui indiquait. Le 23 septembre 1846, **Galle** trouvait Neptune à 1° de la position indiquée par **Le Verrier**.

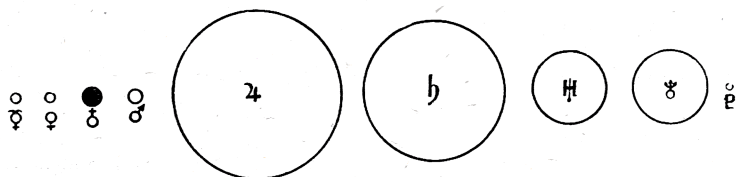


Fig. 167. — Grosseurs comparées des planètes principales.

1. **LE VERRIER**, astronome français (1811-1877).

La découverte de cette planète est une date mémorable de l'histoire de l'Astronomie, et la plus belle confirmation de la valeur de la Mécanique céleste, fondée sur les lois de Newton.

Un astronome anglais, Adams, par des calculs analogues, avait abouti à une conclusion du même genre. Probablement victime de l'incrédulité des astronomes anglais, son travail ne fut pas publié.

La distance de Neptune est 30,1, tandis que le nombre suivant de la suite de Bode est 38,8. De sorte que ce qui consacra la gloire de Le Verrier amena le discrédit sur la loi de Bode.

Neptune a deux satellites.

■ **145. Pluton.** — L'astronome américain LOWELL avait annoncé en 1915, à la suite de calculs sur des perturbations d'Uranus non imputables à Neptune, l'existence d'une autre planète, dont il donnait la distance à 43 UA. Ce n'est qu'en 1930 que la planète fut découverte sur un cliché photographique de la constellation des Gémeaux.

C'est un petit astre, moins gros que la Terre, que l'on a nommé **Pluton**. Il tourne en 249 ans, à une distance 39,5 UA du Soleil.

On n'a pu encore observer Pluton que sur une faible partie de son immense trajectoire.

◀ LECTURE ▶

Mercure, Vénus, Mars, Jupiter et Saturne étaient connus de toute antiquité; il ne fallait que des yeux pour les apercevoir et un peu d'attention pour reconnaître leurs mouvements propres.

Longtemps, on a cru que ces planètes étaient les seules; en y joignant le Soleil et la Lune, on formait le nombre *sept*, mystérieux et révérend. Képler a été jusqu'à vouloir prouver qu'il ne saurait y en avoir un plus grand nombre.

Quand les lunettes eurent fait découvrir les 4 satellites de Jupiter, et le plus gros de Saturne, le nombre des corps circulant autour du Soleil, en comptant la Terre, s'élevait à 12, et Huyghens eut la faiblesse de prétendre démontrer qu'il était irrévocablement fixé.

La découverte de nouveaux satellites des planètes, puis celle d'Uranus par Herschel a fait justice de ces considérations.

(D'après DELAMBRE, rapport présenté à Napoléon I^{er} en 1808.)

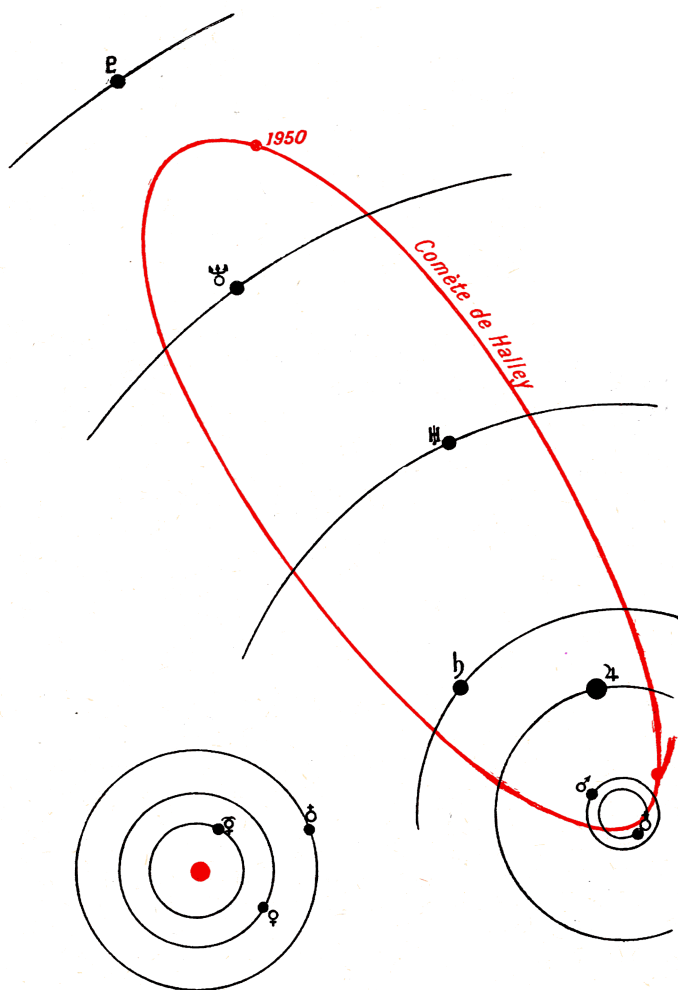


Fig. 168. — Comparaison des orbites des planètes et de l'orbite de la comète de Halley.

(Pour Mercure et Vénus, l'échelle a été agrandie.)



Fig. 169. — Inclinaison des orbites planétaires sur le plan de l'écliptique.

5

COMÈTES.
MÉTÉORES

Il avait dit : tel jour cet astre reviendra

Et l'astre effrayant dit aux hommes : me voici !

VICTOR HUGO : *La Comète.*

■ **146. Comètes.** — Une comète se présente, quand elle est visible à l'œil nu, sous la forme d'un point brillant appelé **noyau** (fig. 170) entouré d'une auréole vaporeuse appelée **chevelure**, qui se prolonge suivant une **queue**. Le mot comète veut dire : *astre chevelu*.

La queue d'une comète est toujours dirigée du côté opposé au Soleil, par rapport au noyau.

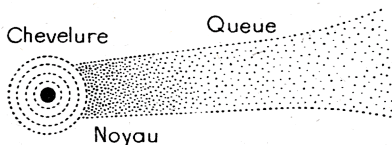


Fig. 170.

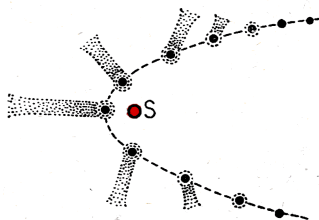


Fig. 171.

En général, une comète apparaît d'abord comme un faible objet lumineux, qui se déplace comme ferait une planète lointaine; mais alors que les planètes sont toutes dans le zodiaque, la comète peut être dans une région quelconque du Ciel. Quand la comète se rapproche du Soleil, la chevelure grandit, puis la queue apparaît, atteignant son maximum quand la comète est au périhélie. Les mêmes phénomènes se reproduisent en sens inverse, quand la comète s'éloigne du Soleil puis disparaît (fig. 171).

Les comètes sont nombreuses, mais la plupart ne sont pas visibles à l'œil nu : en 1949, 7 comètes ont pu être observées mais toutes étaient télescopiques.

Exceptionnellement, de grandes comètes apparaissent dans le Ciel; elles ne manquent pas alors d'exciter l'imagination des hommes, et souvent leur admiration; la grande comète de juin 1910 déployait une queue qui occupait 10 degrés dans le Ciel : un tel astre ne peut passer inaperçu, et, pour peu qu'un

phénomène terrestre coïncide avec son apparition, on ne manque pas de rapprocher ces coïncidences pour y voir une cause et un effet : la comète de 1811 brilla dans une année de sécheresse qui fournit un vin excellent et l'on parla longtemps du « vin de la comète » ; celle de 1910 éclaira les inondations de Paris.

■ **147. Orbite des comètes.** — Le plan de l'orbite a une orientation quelconque dans le Ciel.

D'après la loi de Newton, une comète, soumise à l'action du Soleil (et on ne la voit plus s'il en est autrement) peut avoir une orbite elliptique, parabolique ou hyperbolique, mais on ne l'observe que pendant une faible partie du parcours.

Comme une ellipse très allongée diffère peu, au voisinage d'un sommet de son grand axe, d'une parabole et même d'une hyperbole, quand une comète se présente, on calcule les éléments principaux de son orbite supposée parabolique. En particulier, on calcule sa distance au périhélie SP (fig. 172). Puis, on compare les résultats trouvés aux éléments des comètes déjà étudiées. Si on trouve une coïncidence suffisante, on en conclut que les calculs se rapportent à deux apparitions successives de la même comète. L'orbite véritable est donc elliptique et on connaît la durée T de la révolution. La troisième loi de Kepler donne le grand axe de l'orbite.

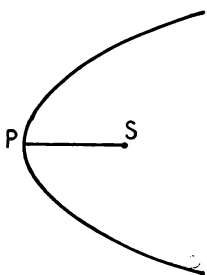


Fig. 172.

On peut alors prévoir les apparitions successives de la comète, et les observations ultérieures constituent la vérification des calculs faits.

Bien entendu, si l'orbite est parabolique ou hyperbolique, on ne reverra jamais la comète.

En 1955, on connaît 47 comètes périodiques, dont on a observé le retour : 33 ont une révolution de moins de 10 ans, leur orbite s'étendant du Soleil à Jupiter ; 6 ont une révolution de 10 à 20 ans, s'étendant jusqu'à Saturne ; 2 ont une révolution de 20 à 40 ans, s'étendant jusqu'à Uranus ; 5 ont une révolution de 40 à 100 ans, s'étendant jusqu'à Neptune, 1 a une révolution de plus de 100 ans, son orbite dépassant largement Neptune.

Mais les orbites elliptiques de 166 autres comètes ont été déterminées.

On a pu également observer et déterminer les orbites de 341 comètes non périodiques, dont 274 sont paraboliques et 67 hyperboliques.

C'est le noyau de la comète qui décrit l'orbite. Il est de faible dimension, quelques centaines de mètres de diamètre. La chevelure peut avoir un diamètre qui varie de 15 000 à 1 800 000 km. Quant à la queue, elle peut atteindre de 30 à 80 millions de km.

■ 148. Quelques comètes remarquables. — 1^o *Comète de Halley*. — En 1682, HALLEY observa une belle comète et l'identifia avec une comète apparue en 1607 et en 1531. La période était donc, en gros, de 75 ans. La troisième loi de Képler donne :

$$a^3 = 75^2$$

et : $a = 17,8$ (U A).

La distance au périhélie, calculée par Halley, étant 0,6, on en déduit les éléments de l'ellipse : (fig. 173).

$$\begin{aligned} a &= 17,8; & c &= 17,2; \\ e &= 0,91; & b &= 4,58. \end{aligned}$$

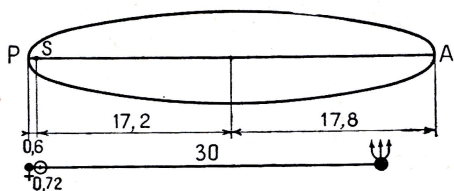


Fig. 173.

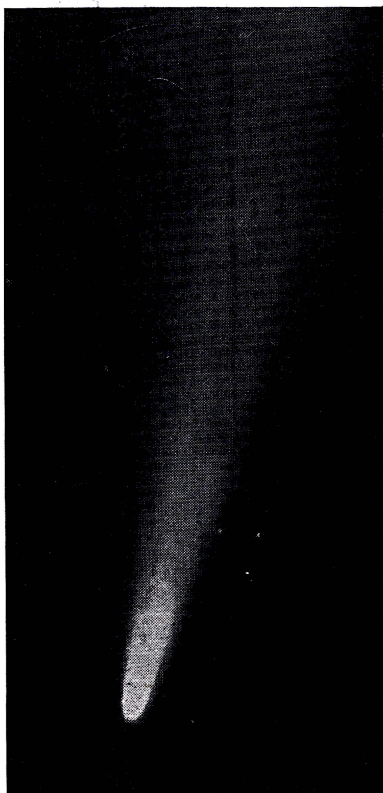


Fig. 174. — Comète de Halley.

Photo de l'Observatoire du Cap (6 Mai 1910).

Au périhélie, elle passe entre le Soleil et Vénus, à l'aphélie, elle dépasse Neptune. La trajectoire a été représentée sur la fig. 168, du système solaire.

La comète de Halley, observée en 1682, aurait dû reparaitre en 1757. Elle ne reparut pas et Clairaut attribua ce retard à des perturbations de la comète par Jupiter et Saturne. Après calcul, il annonça le retour de la comète pour mars ou avril 1759 : la comète passa au périhélie le 12 mars 1759. Elle reparut en 1835 et en 1910. Sa prochaine apparition aura lieu en 1985. Son mouvement est rétrograde.

2^o Comète d'Encke. — Sa période est de 3 ans 4 mois ; c'est la comète dont la révolution est la plus courte. Elle se rapproche du Soleil un peu plus que Mercure et s'en éloigne un peu plus que Mars, mais moins

que Jupiter. Sa dernière apparition est de juillet 1954. Mais elle est difficile à observer.

3° Comète de Biela. — Elle a été observée en 1772 pour la première fois. Sa période est de 6 ans et demi. L'orbite de cette comète rencontre l'orbite terrestre et, en 1832, les deux astres ne passèrent à ce point commun qu'à un mois d'intervalle. La comète ne fut pas observée en 1839. En 1846, on la revit, mais elle était dédoublée en deux comètes voisines, suivant la même trajectoire. En 1852, les deux fragments s'étaient écartés, l'un ne passant au périhélie que 16 heures après l'autre. On ne l'a plus revue depuis.

4° Comètes récentes. — On a pu observer la comète *Arend-Roland* en avril 1957 et la comète *Mirkos* en août 1957.

■ **149. Constitution des comètes.** — Le noyau des comètes est probablement solide; le passage à proximité d'une planète perturbe la marche de la comète, mais non celle de la planète : la comète a donc une faible masse. Le noyau est vraisemblablement désagrégé en fragments.

La chevelure est gazeuse, extrêmement raréfiée. On voit les étoiles au travers. Les gaz, enfermés dans le noyau quand la comète est loin du Soleil, s'en échappent quand le Soleil est assez voisin pour produire une élévation sensible de température.

Les gaz de la queue (oxyde de carbone et azote ionisé) sont encore plus raréfiés que dans la chevelure.

En 1910, la queue de la comète de Halley a pénétré dans l'atmosphère terrestre. Aucune modification de notre atmosphère n'a pu être décelée. Il est vraisemblable que le « vide » d'une queue cométaire est au moins de l'ordre du « vide » d'un tube à incandescence, et que l'illumination est due à la fois à la diffusion de la lumière solaire et aussi à une fluorescence propre, excitée par les rayons solaires ultra-violet.

■ **150. Météores, météorites.** — On voit, par les nuits claires mais sans lune, surgir dans le Ciel des points lumineux, aussi brillants que les étoiles, qui décrivent rapidement une trajectoire pouvant atteindre 25 degrés, et qui s'éteignent deux ou trois secondes après leur apparition. Les astronomes les nomment **météores** (de préférence à : étoiles filantes).

Les météores apparaissent à 100 ou 120 km de la Terre; quand ils disparaissent, ils en sont encore à 60 km, hauteurs mesurées par un procédé de triangulation.

Un météore est produit par le passage rapide dans l'atmosphère terrestre d'un corpuscule plus ou moins gros appelé **météorite** : le frottement dû à sa vitesse porte la météorite à l'incandescence et, le plus souvent, amène sa volatilisation.

La vitesse des météorites est considérable; d'après des observations faites pendant plusieurs mois, 54 % dépassent la vitesse de 42 km par seconde, les autres étant moins rapides.

Leur origine est variable.

1^o *Essaims de météores.* — Les nuits où les météores sont nombreux, ils semblent avoir des trajectoires rectilignes, qui paraissent jaillir d'un même point du Ciel, appelé **point radiant**. On en conclut que ces trajectoires sont des droites parallèles, qu'un effet de perspective fait paraître concourantes. On dit que ces météores constituent un **essaim**. Ainsi, du 10 au 13 août apparaît l'essaim des **Perséides**, ainsi nommé parce que le point radiant est dans la constellation de Persée; du 14 au 18 novembre, on voit les **Léonides** dont le point radiant est dans la constellation du Lion. Et la pluie d'étoiles filantes que nous avons mentionnée après la disparition de la comète de Biela a son point radiant dans Andromède; elle forme les **Andromédides**.

Ces phénomènes s'expliquent bien si l'on admet qu'il existe dans l'espace un grand nombre de corpuscules décrivant ensemble, autour du Soleil, des ellipses voisines dont le centre du Soleil est un foyer. La Terre traversant en A ce courant de corpuscules, il se produit une pluie météorique. L'année suivante, la Terre revenant en A, la même pluie se reproduit (fig. 175).

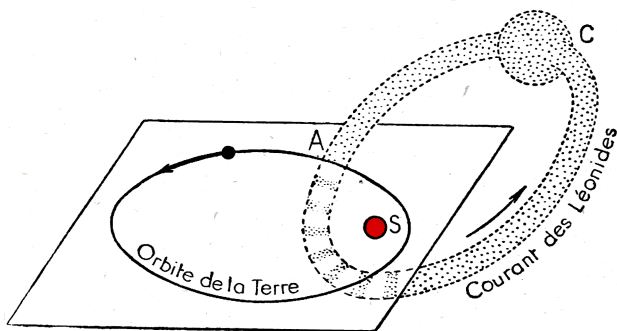


Fig. 175.

Tous les 33 ans, la pluie du 11 novembre est particulièrement abondante. On explique cela par la présence, dans l'essaim des Léonides, d'une condensation C de corpuscules, dont la révolution sidérale serait de 33 ans. On a observé cette pluie en 1833, et 1866; elle n'a cependant pas été observée en 1899.

On a cru identifier le courant des Léonides avec la trajectoire d'une comète disparue en 1866. C'est douteux, les Léonides ayant été notées dès l'an 902. Cependant, la fragmentation de la comète de Biela, et l'apparition des Andromédides éclairent ces

phénomènes : un noyau cométaire se disloque (par l'attraction des planètes successives), s'éparpille sur sa trajectoire, et le nuage des poussières et des blocs de toutes dimensions qui en résulte continue à tourner, quelques parcelles se volatilissant à chaque traversée de notre atmosphère.

Tous ces essais restent liés au système solaire; leur vitesse est inférieure à la vitesse limite de 42 km/seconde, qui leur permettrait d'échapper à l'attraction solaire.

2° Un grand nombre de météorites viennent isolément de tous les points du Ciel, sans former d'essaims.

Ce sont des poussières de toutes dimensions mais ne formant pas de courants continus comme les précédentes. Les déterminations les plus récentes de leurs vitesses semblent montrer que la plupart d'entre elles restent encore soumises à l'attraction solaire. Leur abondance prouve qu'en dehors des planètes, des comètes périodiques et de leurs débris, le Soleil maintient dans son champ d'action des nuages importants de matériaux obscurs.

3° *Aérolithes*. — Une météorite peut s'approcher suffisamment de la Terre pour apparaître comme un globe lumineux, que l'on appelait autrefois un bolide. Parfois, elle éclate et parseme la Terre, dans une aire étendue, de pierres de dimensions diverses, appelées *aérolithes*. Il arrive d'ailleurs que le bruit d'éclatement soit un phénomène sonore d'onde de choc, sans qu'il y ait éclatement véritable avec dispersion de matériaux, et le bolide entier peut tomber sur la Terre.

EXEMPLES. — 1° Le 14 mai 1864, un énorme bolide éclata non loin de Montauban, et arrosa de plus de 1 000 pierres brûlantes une aire elliptique, d'environ 5 sur 15 km.

2° Le 30 juin 1908, en Sibérie, s'abattit un bolide dont la masse a été évaluée à plusieurs milliers de tonnes. L'ébranlement de l'atmosphère faucha des arbres à 50 kilomètres de distance.

Le Meteor-Crater, aux États-Unis, a une origine analogue.

3° Le 17 novembre 1955, un bolide très lumineux a été visible au cours de l'après-midi dans le Ciel de la France.

Les aérolithes, dont on a de nombreux échantillons, sont de nature pierreuse. Quelques-uns ont une teneur importante en fer et en nickel. On n'a trouvé, dans leur composition, aucun corps qui ne fût connu sur la Terre. Ce sont les seuls corps célestes, autres que la Terre, que l'on puisse toucher et analyser en laboratoire.

CHAPITRE VI

CONSTITUTION PHYSIQUE DU SOLEIL

- 1. Notions d'analyse spectrale.
- 2. Constitution physique du Soleil.

1

NOTIONS D'ANALYSE SPECTRALE¹

Si notre vue s'arrête là, que l'imagination passe outre : elle se lassera plutôt de concevoir que la nature de fournir.

PASCAL.

■ **151. Spectres continus.** — Si l'on reçoit sur un prisme, à travers une fente fine, la lumière émise par un manchon de bec Auer, elle en sort dispersée et s'étale sur un écran sous la forme classique du **spectre**; les couleurs se succèdent du rouge au violet dans l'ordre où nous les voyons dans un arc-en-ciel.

A chaque couleur correspond une longueur d'onde de la lumière, mesurée par les physiciens grâce au phénomène des interférences. Ces longueurs varient de $0,8\mu$ à $0,4\mu$ du rouge au violet.

Si l'on reçoit le spectre sur une plaque photographique, la plaque est impressionnée au-delà du violet. Il y a donc des longueurs d'ondes, inférieures à $0,4\mu$, qui n'impressionnent pas l'œil mais qui sont révélées par la plaque sensible. Cette partie du spectre est l'**ultra-violet**. Elle est d'autant plus étendue que la température de la source est plus élevée.

Si l'on reçoit le spectre sur un thermomètre sensible, on voit que des radiations, de longueur d'onde supérieure à $0,8\mu$ se trouvent à l'extérieur du spectre du côté du rouge. C'est la partie **infra-rouge** du spectre, qui n'impressionne ni l'œil, ni la plaque photographique ordinaire. Cette partie peut exister même sans que la source soit lumineuse,

1. NOTA. — Ces notions sont rappelées ici pour éviter des renvois au Cours de Physique. Nous les avons adaptées spécialement à leur usage en Astrophysique.

En résumé,

—> Un corps solide (ou un gaz très fortement comprimé) incandescent émet un **spectre continu**, prolongé au-delà de la partie visible.

■ **152. Spectres de gaz et vapeurs.** — Un gaz incandescent ou un corps simple à l'état de vapeur donne un spectre formé d'un certain nombre de raies brillantes.

EXEMPLE. — Une trace d'un sel de sodium, placée dans la flamme d'un brûleur Bunsen, donne naissance à un spectre formé de deux raies jaunes, voisines, dont les longueurs d'onde sont $0,5890 \mu$ et $0,5896 \mu$. Ces raies caractérisent le sodium.

Chaque gaz atomique ou chaque vapeur métallique est ainsi caractérisé par un ensemble de raies, qui permettent d'en reconnaître des traces même infinitésimales dans la source qui l'a vaporisé.

La température de la source joue d'ailleurs un rôle important.

1° Spectre d'arc. — Si l'on chauffe de l'hydrogène, par exemple, jusqu'à ce que le spectre apparaisse, on obtient des raies dont le nombre augmente avec la température. Ces raies forment une série dite de **BALMER**, qui les découvrit en 1885. Elles correspondent aux différents rayons des orbites que l'unique électron qui se trouve dans l'atome d'hydrogène peut décrire autour du noyau.

● On appelle **spectre d'arc**, le spectre produit par un atome pourvu de tous ses électrons.

On l'appelle ainsi parce que c'est le spectre obtenu quand on ne dépasse pas la température de l'arc électrique.

2° Spectre d'étincelle. — Si un atome est porté à une température suffisamment élevée, ou s'il reçoit des chocs violents produits par des radiations à grande vitesse, il peut expulser un ou plusieurs de ses électrons. On dit alors qu'il est **ionisé**.

EXEMPLE. — L'atome de calcium est formé d'un noyau autour duquel gravitent 20 électrons. Il est alors électriquement neutre. Nous le représenterons par CaI .

S'il perd un électron, on dit qu'il est **ionisé une fois**. Nous le représenterons par CaII .

CaI donne un **spectre d'arc**.

CaII donne un spectre différent du précédent, mais non moins caractéristique. On l'obtient quand on fait éclater une étincelle très chaude entre deux électrodes de calcium. On l'appelle un **spectre d'étincelle**.

● On appelle **spectre d'étincelle** le spectre produit par un atome **ionisé**, c'est-à-dire privé d'un ou de plusieurs électrons.

Un même atome peut donner un spectre d'arc et plusieurs spectres d'étincelles, suivant qu'il est ionisé une fois, deux fois, etc. Mais plus l'ionisation est forte, et plus les raies sont repoussées dans l'ultra-violet.

Un spectre d'étincelle caractérise un atome tout comme son spectre d'arc.

3° Spectres de bandes. — Les spectres envisagés jusqu'ici caractérisent des atomes de corps simples.

Si l'on étudie des molécules composées, telles que celles du gaz ammoniac, du cyanogène, d'oxydes métalliques, oxyde de titane en particulier, on obtient des spectres formés de *bandes*, encore caractéristiques de la molécule correspondante.

Les spectres de bandes ne s'obtiennent qu'à des températures assez basses, car les molécules se dissocient en atomes à une température suffisamment élevée.

■ **153. Spectre d'absorption.** — La lumière blanche d'un arc électrique donne un spectre continu.

Un peu de sodium dans la flamme d'un brûleur Bunsen donne les deux raies jaunes du sodium.

Si l'on place le brûleur entre l'arc et la fente du spectroscope, le spectre continu présente deux raies sombres là où nous avions vu les deux raies du sodium. C'est le phénomène du *renversement des raies*, mis en évidence en 1860 par KIRCHHOFF.

Le sodium qui est dans la flamme absorbe les radiations qu'il est capable d'émettre. Il continue à émettre ses propres radiations, mais la température de la flamme étant inférieure à celle de l'arc, il émet moins qu'il n'absorbe; cela se traduit par des raies sombres sur le spectre préalablement continu.

La place de ces raies, et non plus leur couleur, continue à caractériser le sodium.

Si la source de lumière blanche était à plus faible température que le brûleur, on verrait un faible spectre continu sur lequel les raies du sodium se détacheraient brillantes : il aurait émis plus qu'il n'aurait absorbé.

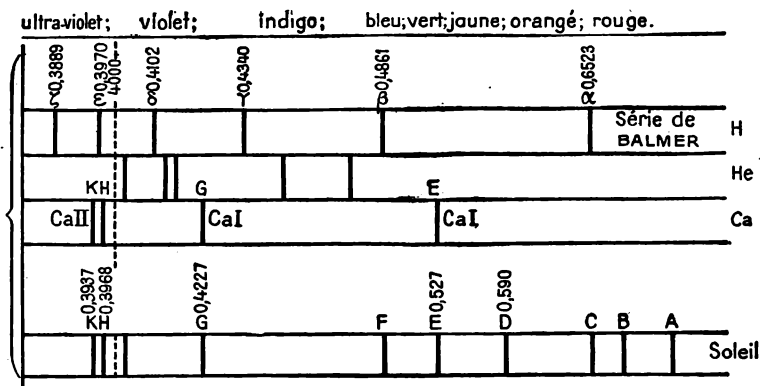
● On appelle *spectre d'absorption* un spectre à fond continu strié de raies sombres.

■ **154. Spectres et température des sources lumineuses.** — Les expériences que nous avons relatées, qu'elles soient relatives aux spectres d'émission ou d'absorption, montrent qu'il existe une relation entre la température de la source lumineuse et l'intensité des raies du spectre, d'une part, entre cette

température et la nature même des raies, d'autre part. Ainsi, l'apparition d'un spectre d'étincelle est toujours l'indice d'une température très élevée, d'autant plus élevée que l'ionisation est plus poussée.

Sans entrer dans plus de détails, nous pouvons comprendre que l'examen comparé de spectres puisse donner des renseignements précieux sur la température de la source lumineuse.

C'est l'emploi des méthodes spectrographiques qui a procuré aux astronomes la plupart des connaissances actuelles sur la constitution physique du Soleil, sur les étoiles et sur l'atmosphère des planètes.



2

CONSTITUTION
PHYSIQUE DU SOLEIL

■ 155. La photosphère. — La photosphère est la partie brillante du Soleil, observable directement à l'œil nu ou avec de petites lunettes (avec protection obligatoire par des verres fumés). On peut la photographier, ou la projeter sur un écran pour l'examiner.

C'est une boule d'un blanc éblouissant, plus brillante dans la région centrale que sur le bord, avec quelquefois des taches noires. C'est la photosphère qui nous envoie la presque totalité du rayonnement solaire.

On distingue, à la surface de la photosphère :

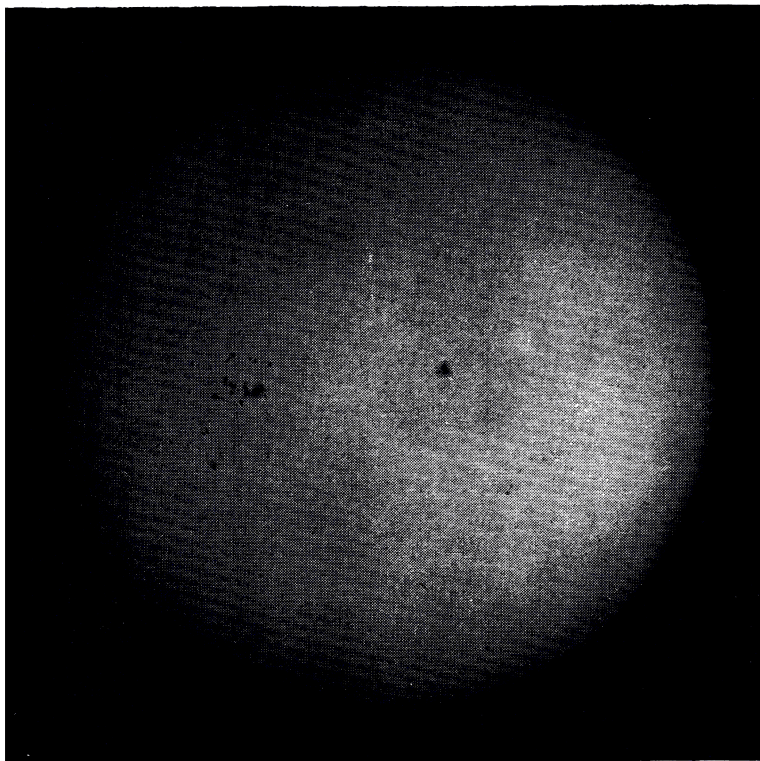


Photo observatoire de Meudon.

Fig. 177. — La Photosphère.

1° de nombreux points brillants, arrondis, se détachant sur un fond moins lumineux; leur diamètre atteint un millier de kilomètres. On les appelle les *grains de riz*.

2° des *taches* sombres, entourées d'un bourrelet brillant.

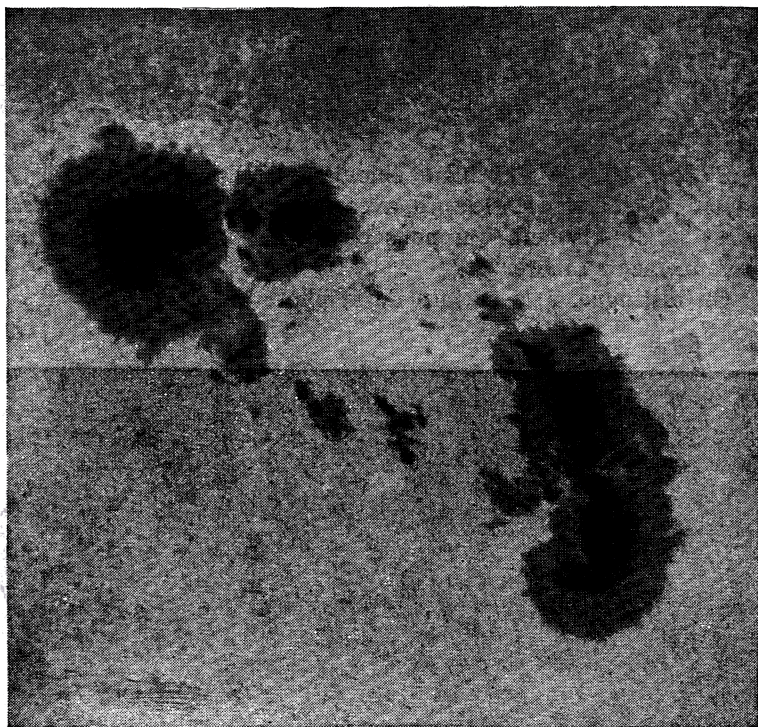


Photo observatoire de Meudon.

Fig. 178. — Groupe de taches solaires.

Ces taches apparaissent, se déplacent à la surface du Soleil, peuvent durer assez longtemps pour qu'on ait pu en déduire la rotation du Soleil (n° 73) et finissent par s'évanouir. Leur amplitude, variable, peut atteindre 180 000 km de diamètre.

Elles sont presque toujours assez voisines de l'équateur solaire, ne s'en éloignant guère de plus de 40°. Leur présence est liée à l'activité solaire; l'observation a montré que cette activité passe par un maximum tous les 11 ans en moyenne.

3° Des *facules*, ou plages très brillantes. Les taches sont entourées de facules, mais il existe des facules sans taches.

Le plus souvent, les taches apparaissent dans une facule;

la formation la plus typique est celle de deux taches qui grossissent en s'écartant l'une de l'autre : la facule qui les entoure s'est elle-même allongée. Les taches disparaissent peu à peu, l'une après l'autre, cependant que la facule perd de son éclat, et tout revient à l'état antérieur.

■ **156. Spectre solaire.** — Le spectre solaire est un spectre continu, strié d'un très grand nombre de raies sombres.

Ces raies ont été découvertes par FRAUNHOFER, au début du XIX^e siècle. Quand les travaux de KIRCHHOFF furent connus, 50 ans après, on comprit que ces raies allaient donner la composition chimique du Soleil.

En les comparant au catalogue dressé des raies émises par les corps simples connus sur la Terre, on put mettre en évidence qu'une soixantaine de ces corps étaient présents dans la couche de gaz qui entoure la photosphère.

De nombreuses raies proviennent de l'absorption par l'atmosphère terrestre : on les appelle les raies *telluriques*. On les élimine en remarquant que leur intensité diminue quand le spectre est pris en haute montagne, tandis qu'elle augmente quand le Soleil est près de l'horizon.

En rapprochant l'étude du spectre de la quantité d'énergie rayonnée par le Soleil, on a déduit que la surface de la photosphère a une température de 7 000° environ. Différentes considérations conduisent à penser qu'à l'intérieur du Soleil, la température peut atteindre 20 millions de degrés.

Les taches seraient la manifestation de mouvements tourbillonnaires, résultat des courants puissants qui agitent la masse des gaz intérieurs, fortement comprimés et ionisés.

■ **157. Atmosphère du Soleil.** — C'est une grande chance que le diamètre apparent de la Lune soit sensiblement égal au diamètre apparent de la photosphère. Cela permet à la Lune, lors des éclipses totales de Soleil, de masquer complètement la photosphère sans déborder et de permettre, par contraste sur le fond obscur du Ciel, d'observer l'atmosphère solaire.

1^o **Couche renversante.** — En examinant le spectre solaire au moment d'une éclipse totale, on voit brusquement, au moment où la Lune couvre la photosphère, apparaître un *spectre de raies brillantes*.

Ce spectre ne dure que quelques secondes (*spectre éclair*). Mais sa photographie montre la coïncidence de ses raies brillantes avec les raies obscures de Fraunhofer.

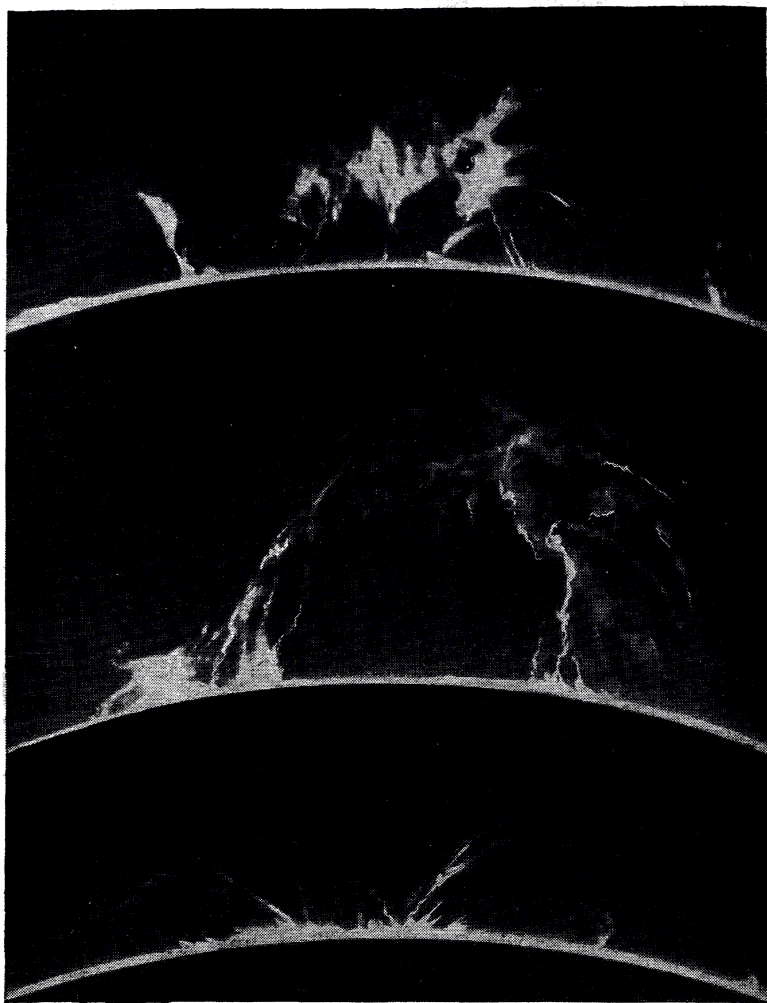


Photo observatoire de Meudon.

Fig. 179. — Protubérances solaires.

La couche qui produit ce spectre est la ***couche renversante***. Elle contient à l'état de gaz ou de vapeurs tous les atomes des corps simples; elle agit en temps normal comme zone d'absorption des radiations émises par la photosphère.

Cette couche est mince (1 à 2" d'arc, soit de 750 à 1 500 km d'épaisseur). Sa température est inférieure à celle de la photosphère, ce qui réalise les conditions de l'expérience de Kirshhoff.

2° **Chromosphère.** — C'est une couche brillante, rosée, beaucoup plus épaisse que la précédente ($\frac{1}{200}$ du diamètre solaire, soit environ 7 000 km).

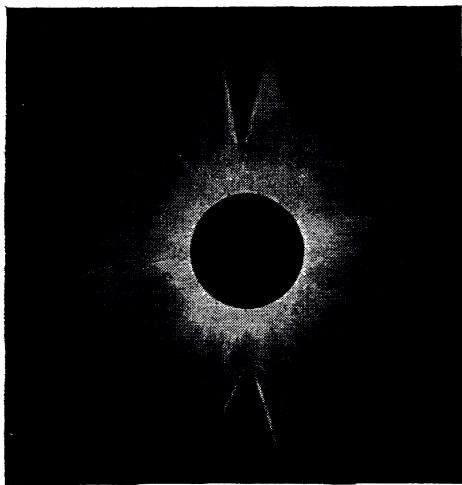
Son spectre est formé de raies brillantes peu nombreuses; on y distingue les raies de l'hydrogène, celle du calcium ionisé (CaII) et un autre groupe qui ne se réduit à aucun type connu. On en conclut à l'existence dans le Soleil d'un corps simple inconnu sur la Terre et on le nomma **hélium** (JANSSEN, 1868). Or, l'hélium fut découvert sur la terre par le chimiste anglais RAMSAY en 1895.

Sur la chromosphère s'appuient de grandes flammes roses de formes variées et rapidement changeantes, appelées **protubérances** (fig. 179). Leur hauteur peut atteindre 16', soit plus de 600 000 km. Elles apparaissent et disparaissent en quelques heures. Leur spectre est celui de la chromosphère. La production des protubérances suit le même cycle que l'activité des taches solaires, avec maximum tous les 11 ans.

3° **Couronne.** — Au-delà de la chromosphère, on observe encore la couronne, blanche, peu lumineuse, d'épaisseur variable, atteignant sensiblement le diamètre apparent du Soleil. C'est dans la couronne que les protubérances s'épanouissent. Il arrive cependant que, brusquement, une protubérance s'élance en ascension rapide et disparaisse au-delà de la couronne, avec une vitesse qui dépasse la vitesse parabolique. Les particules ainsi projetées ne retomberont pas sur le Soleil.

La couronne est extrêmement raréfiée;

son spectre, sur un fond continu et peu lumineux provenant de la lumière solaire diffusée, laisse voir quelques raies brillantes que l'on a d'abord attribuées à un gaz inconnu (*coronium*). On sait maintenant qu'il s'agit d'atomes très fortement ionisés (10 à 15 électrons



Bulletin de la Société Astronomique.

Fig. 180.

La couronne lors d'une éclipse totale.

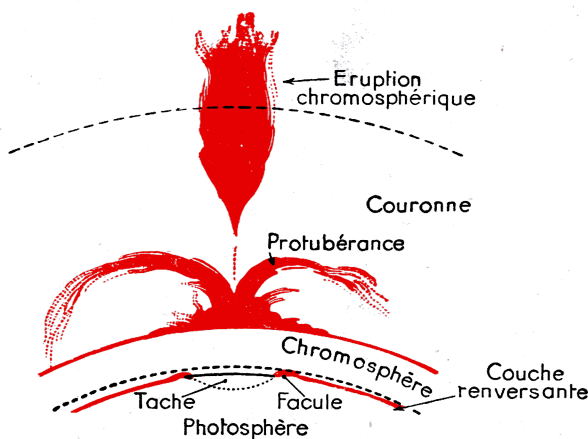


Fig. 181. — Les couches de l'atmosphère solaire.

expulsés), en particulier du fer et du nickel. Ces conditions d'ionisation ne sont compatibles qu'avec une pression très faible et une température très élevée. Ce sont probablement des éléments provenant des profondeurs du Soleil et lancés dans la couronne.

En résumé, la couronne semble formée d'électrons libres et d'atomes ionisés.

L'observation de la couronne a été rendue facile, en dehors des éclipses, par l'invention du **coronographe** par LYOT¹. En recevant l'image du Soleil sur un disque métallique, à l'intérieur d'une lunette, on peut examiner à l'oculaire, photographier, spectrographier les diverses parties de l'atmosphère solaire. Des films remarquables de protubérances ont pu ainsi être obtenus, à l'Observatoire du Pic du Midi (Hautes-Pyrénées), et projetés sur les écrans des salles obscures.

■ 158. **Spectrohéliographe.** — L'observatoire de Meudon s'est spécialisé dans l'étude du Soleil.

C'est son directeur, Janssen, qui a découvert l'hélium en observant une éclipse aux Indes.

En 1891, DESLANDRES put établir une observation continue de la chromosphère non plus par la tranche, comme au cours d'une éclipse, mais sur toute la surface, à l'aide du **spectrohéliographe**.

1. Bernard LYOT, astronome français, décédé en 1952 au Caire, à son retour de Khartoum, d'où il venait d'observer l'éclipse totale de Soleil du 27 février 1952.

On isole, à l'aide d'une fente sélectrice, une radiation déterminée, par exemple la raie K du calcium ionisé. Tout le reste du spectre se trouve alors masqué. En déplaçant simultanément la fente du spectroscopie et la fente sélectrice, on peut obtenir, de proche en proche, la photographie de toute la surface de la chromosphère, en lumière monochromatique.



Fig. 182. — Spectrohéliogramme.

Photo observatoire de Meudon.

EXEMPLE. — Les clichés des figures 182 et 183 ont été obtenus par M. D'AZAMBUJA, directeur de l'observatoire de Meudon. On voit, sur le premier, pris avec la raie H_α de l'hydrogène, la répartition de l'hydrogène dans la chromosphère. Le second, pris avec la raie K du calcium ionisé, donne la répartition des nuages de calcium.

Sur l'un et l'autre, on aperçoit des protubérances sous forme de longues traînées obscures.

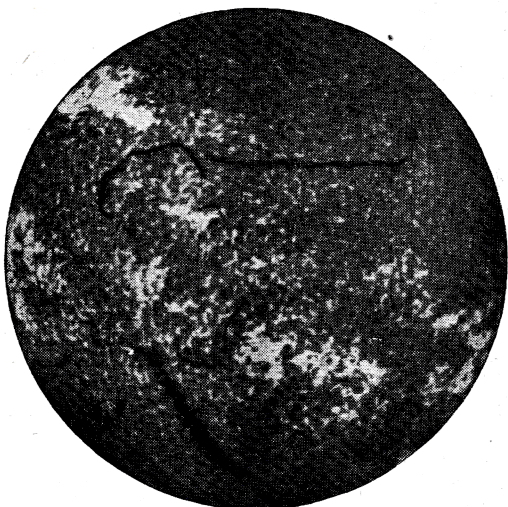


Fig. 183. — Spectrohéliogramme.

Photo observatoire de Meudon.

■ **159. Lumière zodiacale.** — Après le coucher du Soleil, en mars et avril on peut voir une faible lueur elliptique

dont le grand axe est dirigé suivant le zodiaque. Elle peut

s'étendre jusqu'à 50°, en s'affaiblissant à mesure qu'on s'éloigne du Soleil (fig. 184). On l'appelle *lumière zodiacale*.

Le même phénomène s'observe en août et septembre, avant le lever du Soleil.

Il semble que des particules de nature encore inconnues diffusent la lumière du Soleil, bien au-delà de la couronne, formant autour du Soleil, dans le plan de son équateur, une auréole lenticulaire dont on aperçoit une partie.

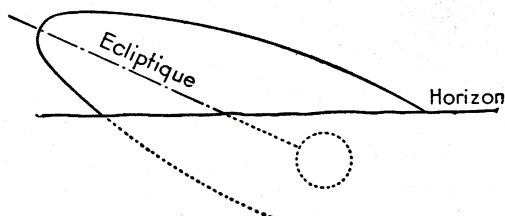


Fig. 184. — La lumière zodiacale.

■ 160. Les divers rayonnements solaires. — 1° Le Soleil rayonne de la chaleur et de la lumière. C'est très important, puisque

ce sont les conditions mêmes de la vie. Mais c'est trop évident pour qu'il soit utile d'insister.

2° Il émet des *rayons ultra-violets*, dont nous recevons un certain nombre; ce sont les agents efficaces des *coups de soleil*, en particulier sur les champs de neige qui les réfléchissent.

Heureusement, la plupart des rayons ultra-violets sont absorbés en traversant notre atmosphère par une couche d'*ozone* qui se trouve entre 20 et 30 km d'altitude. Sans l'ozone, les rayons ultra-violets seraient très dangereux. Mais cette même

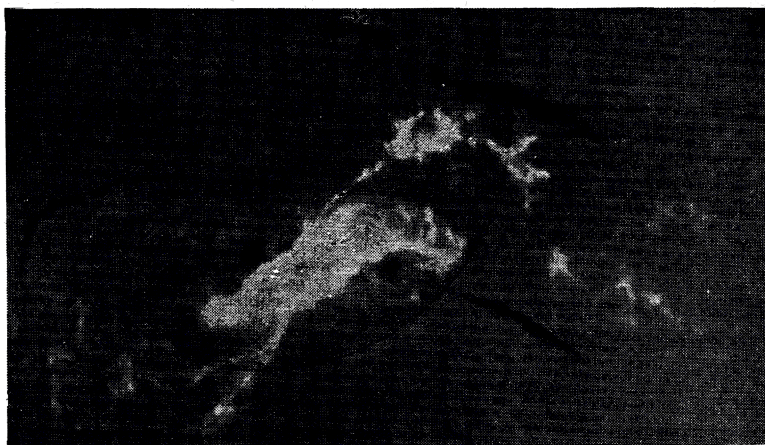


Photo observatoire de Meudon.

Fig. 185. — Éruption du 25 juillet 1946.

couche prive les astronomes du spectre de l'ultra-violet. On a cherché à s'en affranchir en envoyant à bord d'une fusée, un spectrographe au-dessus de la couche d'ozone. Les clichés ont été recueillis et montrent de nombreuses raies dans l'ultra-violet lointain. Les recherches continuent dans ce sens.

3° A certains moments, des *éruptions solaires* particulièrement importantes se produisent. Elle se manifestent à nous, en dehors de l'observation directe :

a) par une recrudescence du rayonnement ultra-violet qui, modifiant l'état de la couche de notre atmosphère par laquelle les ondes radioélectriques sont déviées vers le sol, dans la propagation à longue distance, provoque l'interruption de la réception des ondes moyennes. L'arrêt peut atteindre une demi-heure et parfois davantage;

b) par une émission de particules électriques, moins rapides que la lumière, et qui, 24 heures après l'éruption, viennent troubler par un *orage magnétique*, les conditions du magnétisme terrestre : affolement des boussoles magnétiques et production d'aurores boréales.

Protubérances, éruptions chromosphériques, ont toutes pour origine une facule, puis des taches. Elles traduisent les réactions explosives puissantes qui se produisent dans la masse de la photosphère. Elles suivent le même rythme undécennal que les taches, comme le montrent les graphiques ci-dessous (fig. 186).

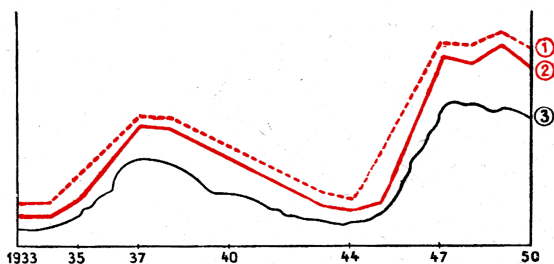


Fig. 186. — L'activité solaire.

1. Variation de la surface des taches solaires.
2. Variation de l'activité solaire.
3. Variation du magnétisme terrestre.

4° Les appareils dits *radars*, qui reçoivent l'écho d'ondes radioélectriques réfléchies sur un obstacle, ont mis en évidence l'émission, par le Soleil, d'*ondes hertziennes* dont les plus intenses ont une longueur de 5 mètres. Elles sont particulièrement perçues lors d'une éruption solaire, mais elles peuvent être observées d'une façon continue.

Cette découverte a été faite en Angleterre, par des postes d'écoute militaires, au cours de la guerre 1939-1945, les radars de ces postes ayant été orientés vers le Soleil.

On comprend que tous ces phénomènes, qui ont une répercussion sur les activités humaines, ont besoin d'être prévus et signalés. Aussi, une entente internationale a-t-elle organisé d'une façon permanente la surveillance du Soleil. Les renseignements mondiaux sont centralisés à l'observatoire de Meudon, d'où un communiqué quotidien, transmis par le poste de Pontoise, signale l'état d'activité solaire. Depuis 1948, un *radio-télescope* fonctionne à Meudon, permettant de suivre les émissions radio-électriques du Soleil, même caché par les nuages.

Au cours d'une éclipse, la Lune couvrant et découvrant progressivement le Soleil, on peut localiser les sources d'émission des ondes sur la photosphère ou dans la couronne. Cela donne un nouvel intérêt à l'observation des éclipses de Soleil (voir la figure de la page 196).

■ **161. Composition chimique du Soleil.** — On admet actuellement, avec l'astro-physicien américain RUSSELL, que les éléments chimiques constituant le Soleil se répartissent ainsi :

CORPS	EN MASSE	EN VOLUME
	%	%
Hydrogène	45	92
Hélium	6	3
Oxygène.	24	3
Vapeurs métalliques. .	25	2

◀ LECTURE ▶

■ **162. D'où vient l'énergie solaire?** — Le Soleil déverse sans arrêt dans l'espace une énergie considérable, par toutes les formes de son rayonnement. La Terre reçoit du Soleil 2 calories environ par centimètre carré et par minute. En raisonnant sur une sphère qui aurait pour rayon l'unité astronomique, on en déduit que le Soleil émet, chaque minute, environ 5.10^{27} calories.

Ce rayonnement se maintient sensiblement constant depuis au moins un milliard d'années, car dès l'époque cambrienne, les eaux de l'océan étaient tièdes, puisque des fossiles d'animaux vivant en eau tiède y abondent.

Quelles sont les sources de cette énergie?

A 6 000°, les corps les plus réfractaires sont volatilisés et dissociés en leurs éléments. Il en résulte que le Soleil est entièrement gazeux et que les combinaisons chimiques ne peuvent se faire, même à sa surface. Il ne saurait donc être question de combustions, dans le sens ordinaire du mot.

On a pensé à la contraction de cette masse gazeuse, qui est réelle; H. POINCARÉ estimait que la contraction du Soleil pouvait assurer son rayonnement pendant 20 millions d'années. Mais nous sommes encore loin de compte.

Les découvertes récentes de radioactivité ont dévoilé ce mystère: le Soleil, comme les étoiles, prend son énergie aux sources nucléaires.

Dès 1919, Jean PERRIN signalait qu'un Soleil qui transformerait en hélium toute sa masse d'hydrogène perdrait moins de 1 % de sa masse et dégagerait l'équivalent de 100 milliards d'années de rayonnement solaire. C'était une vue théorique, qui, en 1938, fut confirmée par les travaux de BETHE.

Ce savant américain a montré, qu'en présence d'un peu de carbone, l'hydrogène se transforme en hélium, après quelques réactions intermédiaires qui restituent entièrement le carbone. Ces réactions sont actives à 18 millions de degrés, la vitesse du cycle de transformation croissant avec la température.

4 atomes d'hydrogène donnent, en définitive, 1 atome d'hélium.

Mais, un atome d'hydrogène a une masse atomique de 1,008; l'atome d'hélium a une masse de 4,004. Il y a donc une perte de masse de :

$$1,008 \times 4 - 4,004 = 0,028$$

ou d'environ $\frac{7}{1\,000}$.

C'est cette masse perdue qui se transforme en énergie. Un défaut de masse de 1 g équivaut à une énergie de $216 \cdot 10^{11}$ calories¹.

C'est cette transformation si hautement productrice d'énergie que l'on a réalisée dans la bombe à hydrogène, sous forme explosive.

C'est elle qui se réalise spontanément à l'intérieur du Soleil, où toutes les conditions requises sont satisfaites : température de 20 millions de degrés à l'intérieur; abondance de l'hydrogène, présence en faible quantité d'atomes de carbone, et l'hélium est comme la cendre témoin de la combustion.

Combien de temps pourra, dans ces conditions, durer le rayonnement solaire?

Sa masse totale est de $2 \cdot 10^{27}$ tonnes. En prenant les nombres donnés par Russell, cela fait $9 \cdot 10^{26}$ tonnes d'hydrogène.

1. D'après la loi d'équivalence Matière-énergie (Einstein-Langevin).

$E = mc^2$

(c vitesse de la lumière).

Si :

$m = 1g,$

$E = (3 \cdot 10^{10})^2 = 9 \cdot 10^{20}$ ergs. = $216 \cdot 10^{11}$ calories

Pour transformer tout cet hydrogène en hélium, il y aura une perte de masse de $\frac{7}{1\,000}$ ou : 63.10^{23} tonnes, soit :

$$63.10^{29} \text{ g} \quad \text{ou :} \quad 63 \times 216 \times 10^{40} \text{ calories.}$$

L'émission du Soleil étant 5.10^{27} calories par minute, elle peut donc durer :

$$\frac{63 \times 216 \times 10^{40}}{5 \times 10^{27}} = \frac{63 \times 9 \times 24 \times 10^{13}}{5} \text{ mn.}$$

Comme une année contient : $365,25 \times 24 \times 60$ mn,
le nombre d'années où le rayonnement reste possible est :

$$\frac{63 \times 9 \times 24 \times 10^{13}}{5 \times 365,25 \times 24 \times 60} \approx \frac{1}{2} 10^{11} \quad \text{ou} \quad 50 \text{ milliards d'années.}$$

Ainsi, le Soleil est une énorme pile atomique, fonctionnant depuis quelques milliards d'années, et pouvant fonctionner longtemps encore.

Depuis 1953, on a découvert un autre cycle de transformation de l'hydrogène en hélium, dit cycle proton-proton (P. P.) dont l'activité solaire serait particulièrement tributaire. Le cycle de Bethe n'est certainement pas le seul mécanisme de production d'énergie.



Photo comm. par la revue L'Astronomie.

Réseau de radiotélescopes à huit antennes,
à la station de radio-astronomie de Nançay, destiné à l'étude
du rayonnement solaire.

CHAPITRE VII

LES ÉTOILES

- 1. Étude comparée des étoiles.
- 2. Distances stellaires.

L'homme ne doit jamais cesser de croire que l'incompréhensible peut se comprendre; sans cela, il renoncerait aux recherches.

GOËTHE.

1

ÉTUDE COMPARÉE DES ÉTOILES

■ 163. **Connaissances antérieures au XIX^e siècle.** — Les Anciens avaient reconnu aux étoiles un caractère de fixité, d'où le nom de *sphère des fixes*, que nous avons conservé. Ils avaient dressé la carte des étoiles visibles et dénommé les constellations qu'ils connaissaient.

La navigation a étendu ce domaine; dès le xvi^e siècle, le Ciel était entièrement exploré, à l'œil nu, et les étoiles classées et dénombrées.

Le classement reposait sur la couleur et sur l'éclat apparent.

1^o **Couleur.** — Jusqu'au xix^e siècle, on classa les étoiles en *bleues, blanches, jaunes, orangées, rouges*.

Cette suite de couleurs fait penser à des températures décroissantes.

2^o **Éclat apparent.** — PTOLÉMÉE répartissait, dans son catalogue, 1 028 étoiles en 6 grandeurs : on a continué et c'est d'après l'éclat apparent que les étoiles visibles à l'œil nu étaient réparties. Aux plus brillantes (*Sirius, Vega*, etc.) on attribuait la 1^{re} *grandeur*; aux dernières étoiles visibles à l'œil nu, la 6^e *grandeur*.

Dans une belle nuit claire, 2 500 étoiles, environ, sont visibles simultanément. Pour tout le Ciel, on en connaît 6 000, ainsi réparties :

Grandeur :	1 ^{re}	2 ^e	3 ^e	4 ^e	5 ^e	6 ^e
Nombre :	21	50	150	450	1 350	4 000

L'emploi des lunettes, puis du télescope, a permis de continuer ce classement jusqu'à la 12^e grandeur.

3^o Fixité des étoiles. — En 1718, HALLEY constata pour Aldebaran, Sirius, Arcturus et Bételgeuse des désaccords de position faibles mais certains avec les observations de Hipparque. Il conclut à un déplacement de certaines étoiles par rapport aux axes fixes. A la fin du XVIII^e siècle, HERSCHEL étendit cette découverte à plusieurs autres étoiles.

Quant à la distance des étoiles, elle restait complètement inconnue, bien qu'il parût évident qu'elle était considérable.

Si l'on joint à cet inventaire sommaire l'apparition en 1572 d'une belle étoile nouvelle, observée par TYCHO-BRAHÉ, on aura une idée de la petite quantité de connaissances qui, depuis les Anciens, avait enrichi l'Astronomie des étoiles.

Cette branche de l'Astronomie a fait, depuis, des progrès considérables. Elle le doit à l'emploi généralisé de la spectrographie, de la photométrie et de la photographie, associées à des télescopes de plus en plus puissants.

■ **164. Spectres des étoiles.** — Reçue dans un spectroscopie, la lumière des étoiles donne un spectre analogue à celui du Soleil : fond continu, avec des raies d'absorption. Exceptionnellement, le spectre de quelques rares étoiles contient des raies brillantes.

L'étude des spectres stellaires s'est poursuivie activement depuis plus d'un demi-siècle, particulièrement à l'Observatoire de Harvard-College, près de Boston.

On peut dire, en gros, que presque toutes les étoiles connues sont réparties en sept classes *principales*, que l'on a désignées par les lettres :

O B A F G K M

correspondant à l'ordre décroissant des températures.

Le classement des spectres porte actuellement sur plus de

400 000 étoiles. On a dû, pour mieux assurer la continuité des séries observées, diviser les classes d'une façon décimale :

$$B_0 \ B_1 \ B_2 \dots, \ B_9 \ A_0 \ A_1 \dots$$

de sorte qu'il n'y a pas plus de différence entre B_9 et A_0 qu'entre A_0 et A_1 .

Le tableau suivant résume les résultats obtenus.

CLASSIFICATION SOMMAIRE DES ÉTOILES

COULEUR	CLASSE	CARACTÈRES DU SPECTRE	TEMPÉRATURE	EXEMPLES
BLEUES	O	Raies d'hydrogène et d'hélium avec raies d'émission colorées (chromosphère très étendue).	20 000 à 30 000°	δ Orion; ζ Poupe.
	B	Raies peu nombreuses : H et He. Quelques métaux (raies fines).	12 000 à 20 000°	<i>Rigel</i> ; β Grand Chien; <i>Épi de la Vierge</i> .
BLANCHES	A	Raies d'hydrogène larges; raies fines de métaux.	8 000 à 12 000°	<i>Sirius</i> ; <i>Véga</i> ; α Andromède; <i>Castor</i> .
	F	Raies d'hydrogène; apparition des raies H et K de CaII. Raies de métaux nombreuses et fines.	7 000 à 8 000°	<i>Procyon</i> ; α Persée; <i>Polaire</i> .
JAUNES	G	Spectre analogue à celui du Soleil. Raies d'hydrogène affaiblies; celles de CaII dominant.	5 000 à 6 000°	Le Soleil; <i>La Chèvre</i> ; β Dragon.
ORANGÉES	K	Spectre couvert de raies de métaux. Apparition de bandes (molécules non dissociées).	4 000°	α Cassiopée; <i>Aldébaran</i> ; <i>Arcturus</i> .
ROUGES	M	Spectre cannelé : bandes de l'oxyde de titane.	3 000°	<i>Bételgeuse</i> ; <i>Antarès</i> ; β Andromède.

On voit que cette classification confirme les renseignements donnés par la couleur apparente, mais apporte des précisions bien supérieures.

La figure 187 montre quelques spécimens de spectres d'étoiles, avec l'indication de la classe correspondante.

REMARQUES. — 1^o Les différences de spectres n'indiquent pas, comme on l'a cru d'abord, une différence de composition chimique des étoiles : elles tiennent essentiellement à la température.

Nous pouvons retenir que le Soleil est une étoile, et qu'elle tient une place à peine moyenne dans l'échelle des températures.

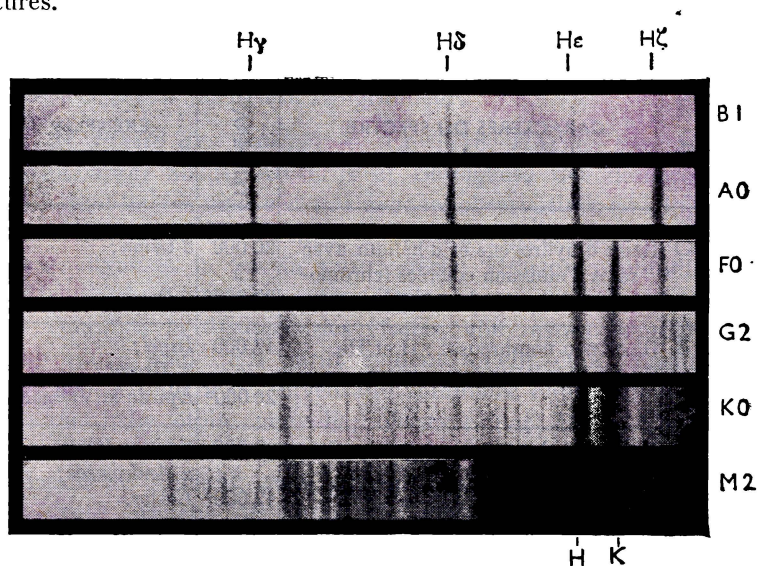


Fig. 187. — Spectres d'étoiles.

Photo Chalonge, communiquée par les Presses Universitaires.

2^o Les températures dont il s'agit sont celles de la couche qui produit l'absorption des radiations émises par le centre. La température intérieure des étoiles, comme celle du Soleil, est bien plus élevée.

3^o Tous les spectres ne révèlent aucun atome nouveau : l'identité de la matière se poursuit dans l'Univers, avec les modifications dues à l'ionisation plus ou moins grande des atomes, suivant les températures auxquelles ils sont soumis.

4^o La classe O ne contient que quelques étoiles; 99 % des étoiles appartiennent aux 6 autres classes.

■ 165. **Grandeur et magnitude.** — A la notion de grandeur, qui était subjective, on a substitué celle de *magnitude*, qui est précise et déduite de la mesure des éclats apparents des étoiles, donnée par la photométrie.

1^o Magnitude apparente. — Une étoile de 1^{re} grandeur a un éclat 100 fois plus grand qu'une étoile de 6^e grandeur.

Formons une progression arithmétique de raison 1 :

$$(1) \quad 0 \quad 1 \quad 2 \quad 3 \quad 4 \quad 5 \quad 6 \dots m$$

et une progression géométrique de raison 0,4, dont le premier terme, correspondant au 0 de la première progression sera 1 :

$$(2) \quad 1 \quad 0,4 \quad 0,4^2 \quad 0,4^3 \quad 0,4^4 \quad 0,4^5 \quad 0,4^6 \dots 0,4^m.$$

Nous remarquerons que :

$$0,4^5 = 0,01024 \neq 0,01.$$

de sorte qu'à une différence de 6 termes de la progression (1) correspond un rapport de $\frac{1}{100}$ dans la progression (2).

Les nombres de la progression (1) sont les **magnitudes apparentes**; ceux de la progression (2) sont les **éclats** correspondants.

Si l'on a choisi une fois pour toutes la magnitude d'une certaine étoile, son éclat est connu, et, par photométrie, on en déduira, dans ce système d'unité, l'éclat d'une étoile quelconque et par suite sa magnitude.

Soit E l'éclat de l'étoile de magnitude m . On aura :

$$\begin{aligned} E &= 0,4^m, \\ \text{d'où :} \quad \log E &= m \log 0,4, \\ \text{et comme} \quad 0,4^5 &= 0,01, \\ \text{on a :} \quad 5 \log 0,4 &= -2 \\ \log 0,4 &= -0,4 \end{aligned}$$

on écrit :
ou :

$$\boxed{\begin{aligned} \log E &= -0,4 m \\ m &= -2,5 \log E. \end{aligned}} \quad (3)$$

Telles sont les formules dites de POGSON, qui lient les éclats aux magnitudes.

Il est évident que ces formules définissent des magnitudes qui ne sont plus des nombres entiers, mais des nombres quelconques, entiers ou décimaux, positifs ou négatifs, de sorte qu'il y a continuité dans l'échelle des magnitudes, alors que l'échelle des grandeurs était discontinue.

EXEMPLES — L'éclat de Sirius est 4,37.

Sa magnitude est :

$$m = -2,5 \log 4,37 = -2,5 \times 0,64048 = -1,6$$

On peut appliquer ce calcul aux planètes et au Soleil.

Vénus a une magnitude comprise entre — 3 et — 4, suivant

sa phase; celle de Jupiter est — 2; celle de Mars varie de + 1 à — 3, celle du Soleil est — 26,7; celle de la pleine Lune — 12,7.

On remarquera, d'après le tableau de la page 220, que des étoiles dites de 1^{re} grandeur ont des magnitudes assez différentes :

Aldebaran : 1,1; Bételgeuse : 0,5 à 1,1 (étoile variable).

Canope : — 0,9; Sirius : — 1,6; Vega : 0,1, etc.

L'emploi des télescopes a conduit à prolonger l'échelle jusqu'à la 16^e magnitude. La photographie, plus sensible que l'œil parce qu'elle peut recevoir des poses prolongées, révèle des étoiles jusqu'à la 21^e magnitude.

Le télescope du Mont Palomar permet de photographier les étoiles jusqu'à la 23^e magnitude.

2^o Magnitudes absolues. — La magnitude apparente d'une étoile dépend de l'intensité lumineuse de l'étoile, mais aussi de sa distance. Pour comparer les intensités lumineuses, il faudrait pouvoir placer les étoiles à la même distance.

On choisit, pour des raisons que nous verrons plus tard (n^o 168), la distance que parcourt la lumière en 32,6 années, soit **32,6 années-lumière** (*a-l*).

● On appelle **magnitude absolue** *M* la magnitude apparente qu'aurait une étoile si elle était à une distance de 32,6 années-lumière de l'observateur.

Soit *m* la magnitude à la distance *d* (en *a-l*)

et *M* la magnitude à la distance 32,6.

A la distance *d*, l'éclat est *E*; à la distance 32,6, il serait *E*₀. Comme les éclats sont inversement proportionnels aux carrés des distances, on a :

$$Ed^2 = E_0(32,6)^2 \quad (4)$$

Or, d'après la relation (3) :

$$m = -2,5 \log E$$

$$M = -2,5 \log E_0$$

d'où :
$$M - m = 2,5 \log \frac{E}{E_0}.$$

et, d'après (4) :

$$M - m = 2,5 \log \left(\frac{32,6}{d} \right)^2 = 5(\log 32,6 - \log d)$$

Comme $\log 32,6 = 1,51322$, on a, en définitive :

$$\boxed{M = m + 7,57 - 5 \log d.} \quad (5)$$

Cette formule est très importante. Elle permet le calcul de M si l'on connaît d . Nous verrons qu'elle sert surtout à déterminer d connaissant $m - M$, que l'on appelle le *module de distance*.

EXEMPLE. — La magnitude apparente du Soleil est — 26,7.

La lumière du Soleil nous parvient en 8' environ ou en :

$$\frac{8}{365,25 \times 24 \times 60} \text{ a-l.}$$

La magnitude absolue du Soleil est :

$$\begin{aligned} M &= -26,7 + 2,57 - 5 (\log 8 - \log 365,25 - \log 24 - \log 60) \\ &= -19,13 + 5 (\log 365,25 + \log 24 + \log 60 - \log 8) \\ &= 4,8. \end{aligned}$$

Ainsi, à la distance considérée, le soleil apparaîtrait comme une étoile de 5^e grandeur. Un calcul plus précis donne : $M = 4,7$.

Pour Sirius, on aurait : $M = 1,3$.

A cette même distance, le rapport des éclats de Sirius et du Soleil serait donné par la relation :

$$4,7 - 1,3 = 2,5 \log \frac{E}{E_0}$$

$$\text{ou :} \quad \log \frac{E}{E_0} = \frac{3,4}{2,5} = 1,36.$$

$$\text{On en déduit :} \quad \frac{E}{E_0} \neq 23.$$

A la même distance, Sirius éclaire donc 23 fois plus que le Soleil.

● REMARQUES. — La détermination précise de la magnitude apparente est délicate : une partie de la lumière émise est absorbée par l'atmosphère, par les verres des instruments d'optique; la plaque photographique est plus ou moins sensible suivant la longueur d'onde dominante dans l'émission.

La détermination de la magnitude absolue est plus facile, bien que cela puisse sembler paradoxal. On admet que des étoiles identiques, quant au spectre, ont même magnitude absolue. Il suffit donc de la déterminer correctement pour un certain nombre d'étoiles de chaque classe.

■ 166. Déplacements stellaires. — 1° La photographie d'un même champ stellaire, à plusieurs années de distance, permet de déceler des déplacements apparents de certaines étoiles. Ce que l'on aperçoit est le déplacement projeté sur un plan perpendiculaire à la direction de l'étoile.

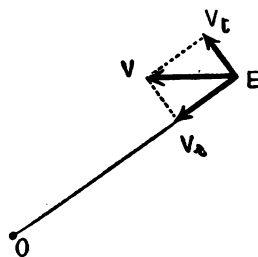


Fig. 188.

Soit $\vec{V}$ la vitesse d'une étoile E, vue de O (fig. 188).

Le déplacement apparent permet de déterminer, si l'on connaît la distance de l'étoile, la vitesse $\vec{V}_r$, projection de $\vec{V}$ sur la perpendiculaire à OE.

Mais la composante $\vec{V}_r$ (vitesse *radiale*) échappe à cette observation.

2^o Or, c'est cette vitesse radiale qui est la plus facile à déterminer, grâce au spectroscopie.

Si l'on reçoit le spectre d'une étoile sur un écran gradué en longueurs d'ondes, on s'aperçoit que, pour certaines étoiles, un groupe de raies bien caractéristiques, que l'on ne peut confondre avec d'autres (la série de Balmer de l'hydrogène pour les étoiles B ou A, les raies H et K du CaII pour les étoiles F ou G,

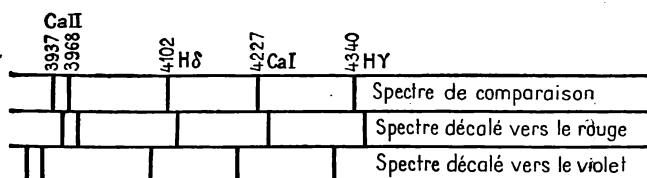


Fig. 189.

par exemple) se trouvent déplacées, soit vers le rouge, soit vers l'ultra-violet (fig. 189).

Tout se passe comme si la longueur d'onde des raies était augmentée (déplacement vers le rouge) ou diminuée (déplacement vers l'ultra-violet).

Ce phénomène très net a été expliqué par DOPPLER, pour les ondes sonores, et par FIZEAU pour les ondes lumineuses. On l'appelle le phénomène DOPPLER-FIZEAU.

Si l'étoile se déplace vers la Terre, sa vitesse s'ajoute à celle de la lumière; le nombre de vibrations reçues par seconde est plus grand pour une raie donnée; la longueur d'onde paraît plus courte; la raie est déportée vers le violet. Le déplacement vers le rouge indique une vitesse de fuite.

Soit λ la longueur d'onde, $\Delta\lambda$ l'accroissement (apparent), V la vitesse radiale de l'étoile, et C la vitesse de la lumière.

$$\text{On a : } \frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{V}{C} \quad (\text{en km-s}).$$

EXEMPLE. — La raie H ($\lambda = 0,3968 \mu$) est déportée à la place d'une raie $0,3972 \mu$ (donc vers le rouge). $\Delta\lambda = 0,0004$.

L'étoile *fuit* avec une vitesse :

$$V = \frac{4}{3968} C \approx 302 \text{ km/s.} \quad (C = 3.10^8 \text{ km}).$$

Voici des exemples de déplacements d'étoiles, le signe — indiquant une vitesse de fuite.

ÉTOILES	Déplacement annuel apparent	Vitesses (km/s)		
		V_t	V_r	résultante
1830 Groombridge.	7"	276	— 97	293
α Centaure	3",6	23	— 22	32
Sirius.	1",3	15	— 7	17
Procyon.	1",2	15	— 3	15
Eridan	0",97	15	+ 15	21

L'étude de ces déplacements a montré que les étoiles de la région de la *Lyre* semblent se rapprocher du Soleil, en s'écartant les unes des autres; celles de la région du *Grand Chien*, diamétralement opposée à la Lyre sur la sphère des fixes, semblent s'éloigner du Soleil et se rapprocher les unes des autres. On en déduit que c'est le Soleil (et le système planétaire qu'il entraîne) qui se déplace dans la direction de la Lyre, à la vitesse de 20 km par seconde.

Le point du Ciel vers lequel le Soleil se dirige s'appelle l'*apex*. Il est voisin de *Véga*.

EXERCICES

On utilisera la formule :

$$M - m = 7,57 - 5 \log d$$

où les distances sont en années-lumière, pour résoudre les questions suivantes.

69. — Une étoile de magnitude apparente 5 est située à 400 années-lumière. Quelle est sa magnitude absolue ?

70. — Quelle est la magnitude apparente d'une étoile dont la magnitude absolue est 2,4, si cette étoile est à 200 années-lumière ?

71. — Une étoile a pour magnitude absolue 5,4 et pour magnitude apparente 2,3. Calculer sa distance.

72. — Deux étoiles E et E' ont même magnitude absolue. Leurs magnitudes apparentes sont m et m' . Calculer le rapport de leurs distances respectives d et d' .

Application :

$$m = 3,6 \quad m' = 6,4.$$

2

DISTANCES
DES ÉTOILES

■ **167. Parallaxe annuelle.** — La circulation de la Terre sur son orbite donne une base connue pour déterminer la distance des étoiles.

Soit T_1 et T_2 les positions de la Terre, sur son orbite, à 6 mois d'intervalle. La mesure des angles ST_1E et ST_2E devrait permettre de déterminer l'angle T_1ET_2 , c'est-à-dire l'angle sous lequel, de l'étoile E , on voit le diamètre de l'orbite terrestre. T_1T_2 étant une longueur connue, le triangle ET_1T_2 serait résoluble trigonométriquement.

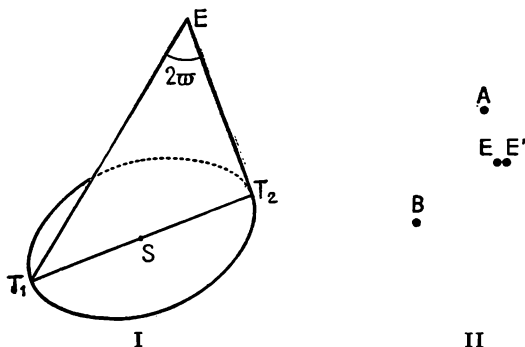


Fig. 190. — Parallaxe d'une étoile.

● On appelle **parallaxe annuelle** (ϖ) ou **trigonométrique**, l'angle maximum sous lequel, de cette étoile, est vu le rayon de l'orbite terrestre.

Le principe de cette mesure paraît simple. Pratiquement, la détermination de la parallaxe présente de telles difficultés que, jusqu'au XIX^e siècle, tous les essais échouèrent.

C'était même un des arguments contre la théorie de COPERNIC : si la Terre est mobile, on doit pouvoir déterminer l'angle T_1ET_2 , alors qu'on n'y réussissait pas.

Notons que c'est au cours de recherches de parallaxes stellaires que BRADLEY découvrit l'aberration des étoiles.

Ce n'est qu'en 1840 que les premières parallaxes furent mises en évidence; BESSEL trouva 0",37 pour l'étoile 61 du Cygne; STRUVE détermina celle de Véga (0",1) et, à l'observatoire du

Cap, fut déterminée la plus grande des parallaxes pour l'étoile α Centaure ($0'',76$). On comprend, en lisant ces nombres, combien ces mesures faites avec de lourdes lunettes méridiennes ont dû demander de soin et pourquoi elles ont échoué si longtemps.

L'emploi de la photographie facilite les mesures des parallaxes. Le procédé est analogue à celui que nous avons décrit pour Eros; mais les deux clichés sont pris du même observatoire à 6 mois d'intervalle. Si les deux clichés font se superposer les étoiles lointaines A, B, C, et si l'étoile E plus proche est venue en E' sur le second cliché, la mesure de l'écart angulaire EE' donne 2ω (fig. 190).

En comparant les résultats obtenus par deux ou plusieurs observatoires, on a déterminé 6 000 parallaxes trigonométriques. Aucune n'atteint une seconde. La plus grande connue est toujours celle de α Centaure ($0'',76$). La distance de cette étoile à la Terre est donc, en UA :

$$d = \frac{1}{\sin 0'',76} = \frac{180 \times 60 \times 60}{0,76 \times \pi} = 271\,400 \text{ UA.}$$

Les confins du système solaire, représentés par Pluton, sont à 39,5 UA du Soleil. Pour atteindre l'étoile la plus proche, il faut donc envisager une distance environ 7 000 fois plus grande.

Rappelons que la lumière met 8 mn 19 s pour nous parvenir du Soleil. Pour parvenir de α Centaure, elle met plus de 4 années.

Nous concluons :

1^o Le système solaire est isolé dans l'espace.

2^o les unités de longueur employées jusqu'à présent ne conviennent plus pour exprimer les distances stellaires par des nombres qui soient compréhensibles.

■ 168. Unités de distances stellaires. — 1^o **Parsec.** — Le parsec (ps) est la distance d'une étoile qui aurait une parallaxe annuelle de 1 seconde.

$$1 \text{ ps} = \frac{180 \times 60 \times 60}{\pi} = 206\,265 \text{ U. A.}$$

(soit 30 840 milliards de km).

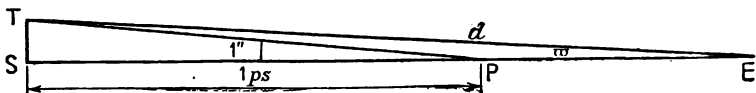


Fig. 191.

Cette unité est commode pour les calculs. On a, en effet, en appelant d la distance de l'étoile à la Terre, en parsec :

$$d = \frac{\sin 1''}{\sin \varpi} \quad (\varpi \text{ en secondes}).$$

et comme il s'agit de très petits arcs :

$$d = \frac{1}{\varpi}.$$

EXEMPLE. — La distance, en parsecs, de α Centaure est :

$$\frac{1}{0,76} = 1,32 \text{ ps.}$$

2^o Année-lumière. — L'année-lumière ($a-l$) est la longueur parcourue par la lumière en une année de 365,25 jours.

$$1 \text{ } a-l = 0,307 \text{ ps;} \quad 1 \text{ ps} = 3,26 \text{ } a-l$$

L'année-lumière est sensiblement égale à 10 mille milliards de km.

Cette unité, moins commode que le parsec pour les calculs, parle davantage à l'imagination. Nous l'emploierons par la suite.

Dans la détermination des magnitudes absolues (N^o 165), on suppose l'étoile placée à la distance de 32,6 $a-l$, ou de 10 ps. La parallaxe est alors 0",1.

En résumé, on mesure avec une assez bonne précision les distances des étoiles qui ont une parallaxe supérieure à 0",1; avec une précision beaucoup moins bonne jusqu'à une parallaxe de 0",01. C'est la limite des investigations par voie trigonométrique; 160 étoiles seulement ont une parallaxe supérieure à 0",1; de 0",1 à 0",01, on en compte 5 000.

Remarquons que, de deux étoiles très voisines en distance, comme α Centaure et Proxima Centaure, dont les parallaxes respectives sont 0",756 et 0",762, l'une a une magnitude apparente de 0,1 (ce qui la classait dans la 1^{re} grandeur), l'autre de 11 (ce qui en fait une étoile télescopique).

Ceci prouve bien que la distance n'est pas le seul facteur qui agit sur l'éclat apparent des étoiles.

■ **169. Sondages plus profonds dans l'Univers.** — **1^o Parallaxe séculaire.** — Nous avons vu que le Soleil se déplace vers l'apex à la vitesse de 20 km-s. Il parcourt ainsi, entraînant la Terre, 4 UA par an. Au bout de n années, la ligne droite parcourue est $4n$ UA, fournissant une base de triangulation $2n$ fois plus grande que le diamètre de l'orbite terrestre.

La parallaxe que l'on peut déterminer à l'aide de cette base est dite *séculaire*, ou *hypothétique*.

Cette méthode donne des indications utiles jusqu'à 1 600 *a-l*; la concordance est satisfaisante avec les parallaxes déterminées par le premier procédé, pour les étoiles proches.

2° Parallaxes spectroscopiques. — Si deux étoiles, E_1 et E_2 ont même magnitude absolue M , et si l'on connaît la distance de l'une, la distance de l'autre s'en déduit.

En effet, soit m_1 et m_2 les magnitudes apparentes des étoiles E_1 et E_2 , d_1 et d_2 leurs distances respectives (en *a-l*), on aura :

$$M = m_1 + 7,57 - 5 \log d_1$$

et :
$$M = m_2 + 7,57 - 5 \log d_2$$

d'où :
$$m_1 - m_2 = 5 \log \frac{d_2}{d_1}.$$

Ainsi, d'une différence des magnitudes apparentes, on saura déduire le rapport des distances.

Mais comment peut-on dire que deux étoiles ont même magnitude absolue?

On l'admet pour des étoiles dont les caractéristiques spectrographiques sont *identiques*, ou dont les périodes de variation d'intensité lumineuse sont égales; les résultats obtenus, quand ils peuvent être vérifiés par la parallaxe trigonométrique, montrent que la précision de cette méthode est satisfaisante.

Ainsi, la lecture de bons spectres d'étoiles d'une même catégorie donne $m_1 - m_2$ par la comparaison des intensités d'une même raie; la distance de l'une s'en déduit si l'on connaît la distance de l'autre.

Il existe des types d'étoiles qui permettent l'application de cette méthode à de très longues distances : ce sont les *géantes* et *supergéantes*, les *céphéides*, et les *novæ*. Nous allons dire quelques mots de chacune de ces catégories si précieuses pour des sondages profonds de l'Univers.

■ **170. Étoiles naines. Étoiles géantes.** — L'astronome américain RUSSELL a eu l'idée de placer sur un graphique environ 300 étoiles dont il connaissait le spectre et la distance, donc la magnitude absolue. Il porte en abscisses les classes spectrales, en ordonnées les magnitudes absolues (fig. 192). Ce graphique a été complété depuis et plus de 6 000 étoiles ont pu le garnir. Les résultats sont remarquables.

1^o La plupart des étoiles se répartissent dans une étroite bande formant sensiblement la diagonale du graphique : c'est la *série principale*.

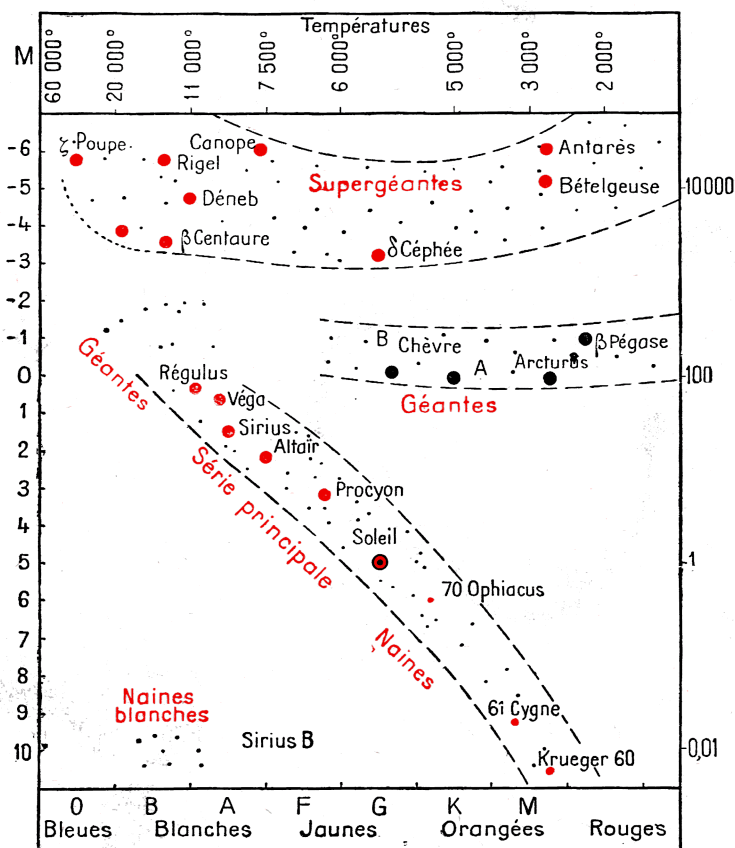


Fig. 192. — Le diagramme de Russell.

2^o Dans un même type spectral, K par exemple, on trouve des étoiles dans la série principale, où leur magnitude est autour de 6, mais aussi dans une branche horizontale, de magnitude voisine de 0, et dans une autre, de magnitude voisine de -5. Ces différences, pour des étoiles de même température, ne peuvent provenir que de leur surface, donc de leur diamètre.

Les premières sont dites *naines*; celles de la branche moyenne sont des *géantes*; celles de la branche supérieure sont les *supergéantes*.

Dans le type B, les naines forment un groupe à part, dit des

naines blanches, de faible magnitude. Les autres étoiles blanches sont des géantes.

Dans les types G, K, M, où les différences entre naines et géantes sont si marquées, les spectres se différencient par les raies d'arc et d'étincelle, bien que la température soit la même. Mais la pression intervient, les géantes étant beaucoup moins denses que les naines. L'intensité des raies d'arc est plus grande chez les naines; celle des raies d'étincelle est plus grande chez les géantes.

Or, les géantes sont visibles de très loin. Leur spectre permet d'avoir leur magnitude absolue, donc leur distance. Cette méthode a acquis une grande finesse et donne les distances avec une précision excellente. Elle concorde avec la mesure trigonométrique quand celle-ci est possible. Elle s'applique jusqu'à 200 000 *a-l.*

● REMARQUE. — La magnitude absolue d'une géante donne son éclat par rapport au Soleil (échelle de droite du graphique). Le rapport des intensités lumineuses donne donc le rapport des surfaces pour deux étoiles de même classe, donc le carré du rapport des diamètres.

EXEMPLES. — En prenant le diamètre du Soleil pour unité, on aurait pour les géantes suivantes, les diamètres indiqués :

Chèvre : 10; Arcturus : 30; Aldebaran : 60;
Bételgeuse : 290; Antarès : 480; Canope : 550.

Si l'on se souvient que l'orbite de la Terre a pour diamètre 214 diamètres solaires, on voit que Bételgeuse ne tiendrait pas dans tout l'orbite terrestre.

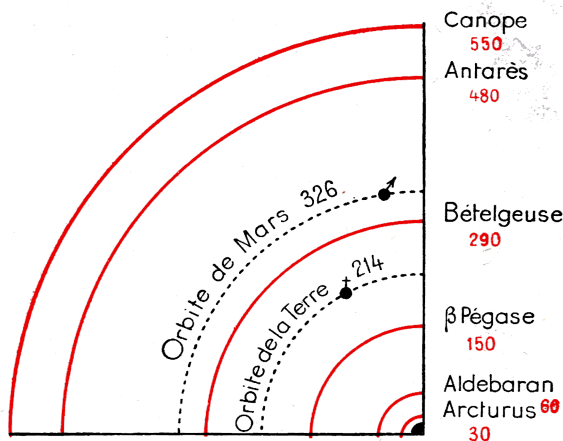


Fig. 193. — Rayons comparés de quelques étoiles géantes.
L'unité est le rayon du Soleil.

■ **171. Céphéides.** — Les céphéides, ainsi nommées d'après la première qui ait été observée, δ *Céphée*, sont des étoiles dont l'éclat présente des variations périodiques. La période de la variation est constante pour chaque étoile; de quelques heures dans les céphéides rapides, elle peut atteindre jusqu'à plusieurs semaines. La période la plus fréquente est de 5 jours.

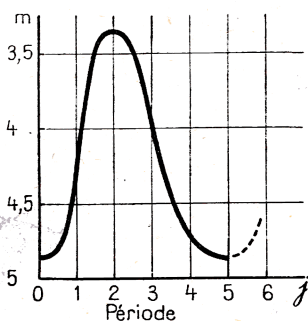


Fig. 194. — Courbe de luminosité de δ *Céphée*.

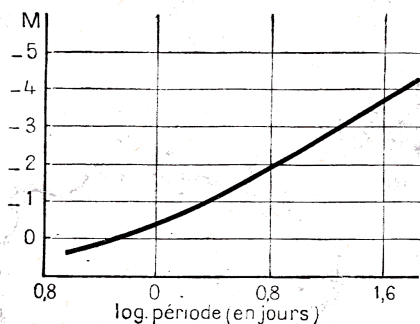


Fig. 195. — Relation entre la période et la magnitude M des Céphéides.

La durée de la période est liée à la magnitude absolue (comme la période d'un pendule est liée à sa longueur). Il suffit donc de photographier plusieurs fois une céphéide pour déterminer sa période, sa magnitude apparente, et en déduire sa distance.

Cette relation entre la période et la luminosité fut une belle découverte (Miss LEAWITT et SHAPLEY, 1912). Mais des travaux récents (au Mont Palomar) ont montré qu'il y a plusieurs types de Céphéides et que l'échelle des distances établie avec quelques-unes d'entre elles ne s'applique pas à toutes.

Étoiles variables. — En dehors des Céphéides, il existe de nombreuses étoiles variables.

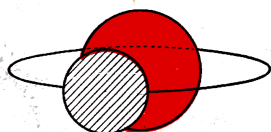


Fig. 196.
L'étoile double *Algol*.
Le compagnon obscur met 9 heures pour passer devant l'étoile principale.

Les unes, comme *Algol* (β Persée) doivent leur variation d'éclat au passage devant l'étoile d'un compagnon plus obscur qui l'éclipse partiellement à chaque tour.

Algol passe de la 2^e magnitude à la magnitude 3,5 pendant 9 heures, puis reprend la magnitude 2 pendant 60 heures.

On connaît plus de 2 000 étoiles de ce genre (catalogue de 1951).

D'autres ont une variation d'éclat comme les céphéides, mais à plus longue période.

EXEMPLE. — *Mira Ceti* (Merveille de la Baleine) oscille en 11 mois de la 2^e à la 8^e magnitude.

Enfin, plusieurs étoiles ont des fluctuations irrégulières.

EXEMPLE. — *Bételgeuse* (α Orion) varie d'une demi-magnitude en 6 mois.

■ 172. Novae. — Il arrive qu'une étoile apparaisse tout à coup dans le Ciel, avec un bel éclat, qui diminue pendant quelque temps. L'étoile redevient alors constante, avec une faible luminosité.

EXEMPLES. — En 1572, Tycho-Brahé observa dans Cassiopée une étoile plus brillante que Sirius. Au bout de 18 mois, elle avait disparu.

En juin 1918, une nova apparaît dans l'Aigle, plus brillante que Vega. Au mois de septembre, elle avait pris la 5^e grandeur, puis diminua jusqu'à la 10^e grandeur.

Les novae ne sont pas, en réalité, des étoiles nouvelles; elles existaient avant leur apparition, mais, de faible grandeur, elles passaient inaperçues. Elles retrouvent en général, après le cataclysme, la grandeur qu'elles avaient, ce qui montre qu'elles

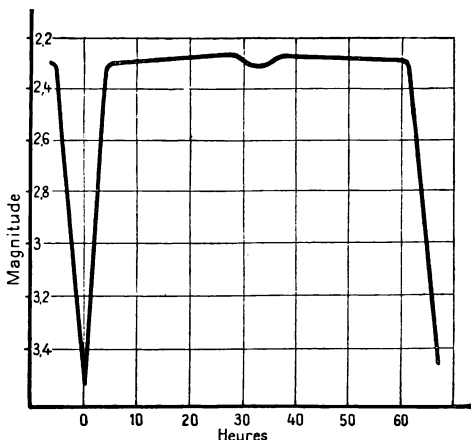


Fig. 197. — Courbe de lumière de l'étoile variable à éclipse Algol.
La période est de 69 heures.

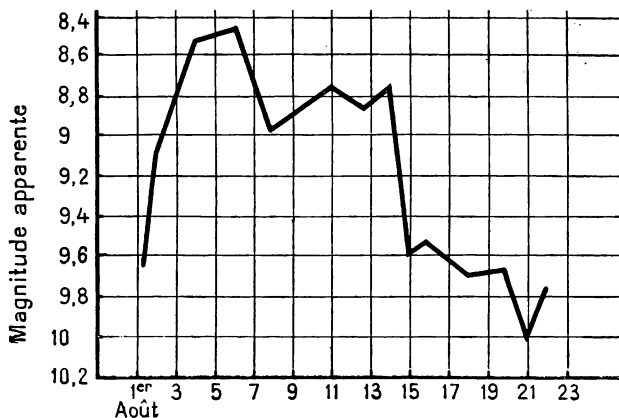


Fig. 198. — Courbe de lumière d'une nova (1949).

n'ont pas été profondément altérées. Il existe même des novae à répétition, de sorte que le phénomène pourrait être périodique.

On a cependant observé des explosions rares, mais beaucoup plus intenses, mettant en jeu toute l'énergie des matériaux de l'étoile qui disparaîtrait alors complètement. On les appelle des *supernovae*. La nova de 1572 en était une vraisemblablement.

En partant de celles dont on connaît la parallaxe, on a constaté qu'à leur éclat maximum, les novae ont toutes une magnitude absolue voisine de -7 , et les supernovae une magnitude absolue voisine de -14 . On peut donc déterminer leur distance au moyen de la magnitude apparente au moment du maximum.

■ **173. Étoiles multiples. Masses des étoiles.** — 1^o Deux étoiles peuvent sembler voisines l'une de l'autre, par un effet de perspective, bien que leur distance soit considérable. Ce ne sont pas des étoiles doubles.

2^o Des étoiles peuvent être associées et tourner autour du centre de gravité du système qu'elles constituent. Ce sont les vraies étoiles doubles ou multiples.

EXEMPLES. — L'étoile variable Algol (n^o 171) est une étoile double.

Sirius a un compagnon (Sirius B); les deux astres tournent autour d'un point G, foyer commun des deux ellipses qu'ils décrivent, et centre de gravité de leurs masses.

On connaît des étoiles triples, quadruples, sextuples (θ Orion). Le nombre des étoiles doubles est considérable.

On s'est même aperçu, par le dédoublement de leurs raies, qu'un grand nombre d'étoiles sont doubles bien qu'on n'arrive pas à les séparer sur les clichés pris au télescope.

Masse des étoiles. — La masse des étoiles doubles peut se déduire de l'étude de leurs mouvements.

EXEMPLE. — *Calcul de la masse de Sirius et de son compagnon.*

Soit m_1 la masse de Sirius, m_2 celle de son compagnon.

Tout se passe comme si la masse m_1 était attirée par la masse $m_1 + m_2$, placée en G, centre de gravité du système, et foyer commun des deux ellipses,

On a : 1^o m_1 GA = m_2 GB (centre de gravité).

2^o Si T est la durée de la révolution de Sirius, on aura

$$\frac{4\pi^2 a^3}{T^2} = k(m_1 + m_2).$$

Admettons que la constante k est universelle. Pour la Terre, on aurait $a = 1$; $T = 1$. En prenant la masse du Soleil pour unité, $m_1 = 1$ et m_2 est négligeable. D'où :

$$k = 4\pi^2.$$

On a donc, dans ce système d'unités :

$$m_1 + m_2 = \frac{a^3}{T^2}.$$

On a trouvé, par mesure directe :

$$T = 50 \text{ ans}, \quad a = 20 \text{ (U A)}$$

d'où :

$$m_1 + m_2 = \frac{20^3}{50^2} = 3,2.$$

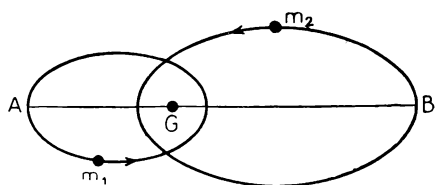


Fig. 199. — Orbits de Sirius et de son compagnon.

Comme $\frac{GB}{GA} = 2,4$ (observation directe), on en déduit :

$$\frac{m_1}{2,4} = \frac{m_2}{1} = \frac{m_1 + m_2}{3,4} = \frac{3,2}{3,4}$$

$$m_1 = 2,26; \quad m_2 = 0,94.$$

Masse-luminosité. — L'astronome anglais EDDINGTON a placé, pour les étoiles dont la masse est connue, les masses en abscisses, et les magnitudes absolues en ordonnées. Il a obtenu un graphique analogue à celui de la figure 200.

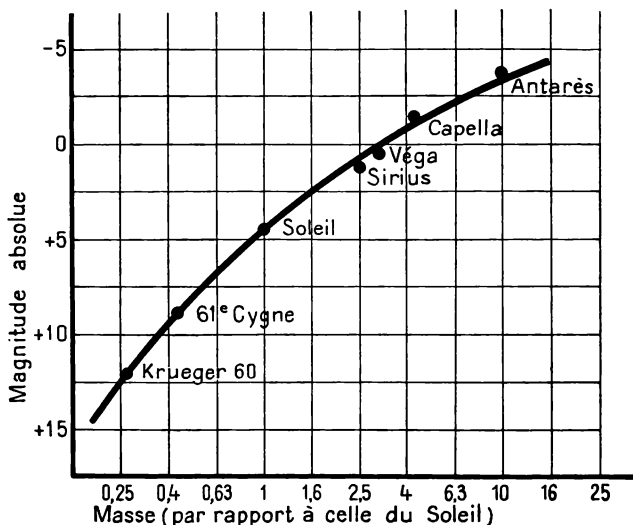


Fig. 200. — La relation masse-luminosité.

Les étoiles observées se rangent ainsi sur une même courbe; il existe donc une relation entre la masse et la luminosité.

La généralisation de ce résultat aux autres étoiles permet

d'en déduire simplement la masse, connaissant la magnitude absolue. Mais certaines étoiles, les naines blanches en particulier, font exception. Dans l'ensemble, alors que les éclats des étoiles forment une échelle si étalée, les masses ne sont pas très différentes de celles du Soleil.

Nous allons en déduire deux conséquences.

1^o Dans la relation établie pour une étoile double :

$$m_1 + m_2 = \frac{a^3}{T^2}$$

si nous acceptons le résultat précédent, on pourra prendre $m_1 + m_2 = 2$.

D'où : $a^3 = 2T^2$.

Ainsi la durée de révolution d'une étoile double détermine le grand axe de son orbite. Si on en connaît le diamètre apparent

α , on aura, ϖ étant la parallaxe d'une des étoiles : $a = \frac{\alpha}{\varpi}$.

D'où : $\frac{\alpha^3}{\varpi^3} = 2T^2$. $\varpi = \frac{\alpha}{\sqrt[3]{2T^2}}$.

Les étoiles doubles fournissent ainsi un nouveau procédé pour trouver une parallaxe.

Ce procédé peut sembler un peu osé; dans le cas de Sirius, c'est 3,2 qu'il aurait fallu mettre au lieu de 2. Mais ce coefficient n'intervient que par sa racine cubique, ce qui réduit singulièrement l'erreur. Et la concordance avec les autres procédés est bonne.

2^o Il résulte du peu de dispersion des valeurs des masses que les densités des géantes et des supergéantes sont très faibles; il s'agit de gaz très raréfiés.

A l'opposé, les densités des naines ont causé une surprise totale.

EXEMPLE. — Sirius B a une masse sensiblement égale à celle du Soleil.

Mais son diamètre est $\frac{1}{50}$ de celui du Soleil. Sa densité est donc sensiblement celle du Soleil, multipliée par $50^3 = 125\ 000$.

Comme la densité du Soleil est 1,4, par rapport à l'eau, cela signifie que 1 cm³ de la matière qui compose Sirius B pèse 175 kg.

Le cas de Sirius B n'est pas le seul. Les étoiles dites *naines blanches*, qui figurent dans le coin inférieur gauche du diagramme de RUSSELL, sont des étoiles très chaudes, mais de

petite dimension. Le record actuel est détenu par la naine *Wolf 457*, dont la masse est 2,5 par rapport au Soleil et le diamètre 0,006. De sorte que sa densité est 16 millions, c'est-à-dire qu'un cm^3 de *Wolf 457* pèse 16 tonnes.

Ces chiffres fantastiques sont incontestables, au moins en ce qui concerne leur ordre de grandeur. On peut admettre que la matière qui constitue les naines blanches est formée d'atomes presque réduits à leur noyau, les électrons ayant été expulsés pour la plupart. Les noyaux seraient alors assez voisins pour expliquer la densité de cette matière.

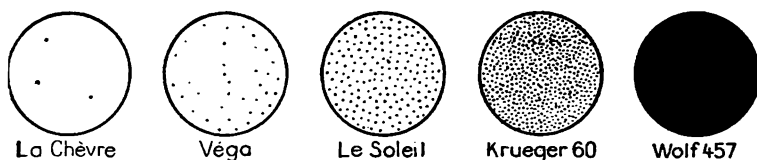


Fig. 201. — Ce dessin schématise la variation de la densité des étoiles, depuis les supergéantes, aux atomes très dispersés, jusqu'aux naines, dont la matière dégénérée est réduite à une accumulation des noyaux atomiques.

On connaît environ 60 naines blanches, parmi les étoiles proches du Soleil, car leur faible éclat les rend invisibles aux plus longues distances. Cela laisse supposer qu'elles sont abondantes dans l'espace.

REMARQUE. — L'inventaire des étoiles distantes du soleil de moins de 5 ps (ou 16 al) comprend 57 étoiles. Aucune n'est à moins de 4 al. Parmi elles, 4 seulement dépassent le soleil en luminosité (*Sirius*, *Procyon*, α *Eridan* et *Altair*); il y a 4 naines blanches, 9 étoiles doubles, 3 étoiles triples. 80 % sont des naines rouges.

■ 174. Résumé. — On connaît :

— par le *spectre*, la **composition** des étoiles, leur **température**, leur **pression**, leurs **déplacements**.

— par des procédés divers, les **distances** des étoiles, ou leurs parallaxes :

<i>trigonométriques</i>	jusqu'à	300 a-l.
<i>séculaires</i>	—	1 200 a-l.
<i>spectroscopiques</i>	—	200 000 a-l.
<i>par les céphéides et novæ :</i>	—	1 000 000 a-l.

— par les *étoiles doubles*, les **masses** des étoiles, ainsi que par la relation **masse-luminosité**. D'où l'on a déduit un nouveau calcul de parallaxe.

◀ LECTURES ▶

■ 175. **Comment évoluent les étoiles.** — Nous avons déjà vu comment le Soleil, par la transformation lente de son hydrogène en hélium, suivant le cycle de BETHE, entretient son rayonnement.

Le grand nombre d'étoiles qui figurent dans la série principale du diagramme de RUSSELL laisse à penser que c'est là le mécanisme normal du rayonnement des étoiles, pour la grande majorité d'entre elles. L'opacité de l'hélium au rayonnement doit amener une élévation de la température du Soleil. Dans une dizaine de milliards d'années, le rayonnement du Soleil passera par un maximum, et le volume commencera alors à décroître. Cette phase peut l'amener assez rapidement non pas à un état refroidi, comme la Terre, mais à celui de naine blanche.

A moins que, poursuivant sa dégénérescence jusqu'à l'état purement nucléaire, les noyaux finissent par se toucher. Les couches externes s'affaissant soudainement sur lui, le cataclysme libérera, en quelques heures une énergie inimaginable et, de Sirius, on apercevra une *supernova*, point final de l'évolution d'une étoile, et naissance d'un astre nouveau (d'après ZWICKY).

Mais nous avons pris cette évolution au milieu. Que font donc les géantes?

Il est probable qu'elles n'en sont pas encore au cycle de BETHE. Leur matière est très raréfiée; leur densité est infime; elles en sont à la période d'échauffement par contraction : leurs atomes d'hydrogène, très libres, bombardent les autres atomes et démolissent les plus fragiles. D'abord, le deutérium, puis le béryllium, augmentant ainsi la température jusqu'à 2 millions de degrés; c'est alors le tour du lithium, puis d'une variété de bore; la température augmente toujours, tant par ces réactions que par la contraction qui continue. Enfin, quand tous ces combustibles sont épuisés, la température est suffisamment élevée pour que s'amorce le cycle de BETHE, et que l'étoile évolue dans la série principale.

Il y a beaucoup d'imagination dans ce processus. Il en faut aux astronomes, pour comprendre ce qui peut sembler incompréhensible. Mais cela explique peut-être que dans les spectres, il ne reste plus trace, dans la série principale, des éléments chimiques dont nous avons parlé.

Explication toute provisoire d'ailleurs : expliquer, c'est rattacher un phénomène inconnu à un autre connu. Et nos connaissances en radioactivité sont si récentes que, sans aucun doute, vingt ans

ne se passeront pas sans qu'on ait découvert des mutations nouvelles, qui aideront à mieux comprendre les grandioses transformations stellaires. La découverte du cycle P. P. en est un exemple.

Les étoiles sont d'ailleurs de types variés; leur évolution n'est pas un phénomène simple et uniforme. Il reste beaucoup à apprendre dans ce domaine. (Voir *L'Univers*, par P. Coudere, 1955).

■ 176. Y a-t-il d'autres systèmes planétaires? — On n'en a jamais vu. Et c'est naturel, car à la distance où nous sommes des étoiles les plus proches, même une planète comme Jupiter tournant autour de α Centaure ne saurait impressionner les plaques photographiques par la lumière qu'elle réfléchirait.

Pourtant, on a mis en évidence la variation d'éclat d'étoiles accompagnées d'un satellite presque obscur, comme Algol.

En 1943, l'Américain STRAND, étudiant des clichés de l'étoile double 61 Cygne, perçut une légère variation dans l'écartement des deux étoiles. Il en déduisit l'existence d'un astre obscur, tournant en 5 ans autour d'une des composantes, et d'une masse égale aux 16/1000 de celle du Soleil. Trois autres découvertes du même genre, la même année, furent faites en Suède; dans les trois cas, il s'agissait d'astres plus gros que Jupiter, tournant chacun autour d'une étoile brillante beaucoup plus grosse qu'eux.

Ce que nous avons dit de la masse des étoiles, toujours voisine de celle du Soleil, laisse penser que ces astres obscurs, avec une masse de 0,016, ne sont pas des étoiles, mais des planètes. On a pu les découvrir justement parce qu'elles sont particulièrement massives; elles ne sont sans doute pas les seules et un télescope encore plus puissant que celui du Mont Palomar nous en révélera. Quoi qu'il en soit, nous devons abandonner l'idée, si elle nous était venue, que notre système planétaire, dont un élément particulièrement modeste a l'avantage de nous porter, serait le seul modèle de ce genre. Depuis 1943, il faut admettre qu'il y a, autour de certaines étoiles, des familles de planètes plus ou moins semblables à la nôtre.

UNITÉS DE DISTANCES

NOMS	Km	U.A	α -l	ps
U.A.	$1,5 \cdot 10^8$	1	$1,6 \cdot 10^{-5}$	$4,8 \cdot 10^{-6}$
Année-lumière . . .	10^{13}	$6,3 \cdot 10^4$	1	0,307
Parsec.	$3 \cdot 10^{13}$	206 265	3,26	1

CATALOGUE SOMMAIRE D'ÉTOILES

NOM	TYPE SPECTRAL	MAGNITUDE	ASCENSION DROITE 1951,0	DÉCLINAISON 1951,0	REMARQUES
			h mn s	° ' "	
α Andromède . . .	A ₀	2,2	0 5 51	28 49 12 N	multiple
β Cassiopée . . .	F ₅	2,4	0 6 33	58 52 47 N	
α Cassiopée . . .	K ₀	2,1-2,6	0 37 43	56 16 8 N	variable
β Andromède . . .	M ₀	2,4	1 6 59	35 21 41 N	
α Petite Ourse (Polaire)	F ₈	2,1	1 49 28	89 2 2 N	
β Persée (Aigol) . .	B ₈	2,3-3,5	3 4 58	40 46 6 N	variable
α Persée	F ₅	1,9	3 20 49	49 41 19 N	
α Taureau (Aldebaran) . .	K ₅	1,1	4 33 6	16 24 45 N	
β Orion (Rigel) . .	B ₈	0,3	5 12 11	8 15 24 S	triple
α Cocher (la Chèvre)	G ₀	0,2	5 13 4	45 57 2 N	triple
γ Orion (Bellatrix) .	B ₂	1,7	5 22 30	6 18 25 N	
δ Orion	B ₀	2,5	5 29 30	0 20 2 S	double
α Orion (Bételgeuse) . .	M ₀	0,5-1,1	5 52 31	7 23 59 N	variable
α Carène (Canope) .	F ₀	— 0,9	6 22 52	52 40 5 S	
α Gd Chien (Sirius) .	A ₀	— 1,6	6 42 59	16 38 51 S	double
α Gémeaux (Castor)	A ₀	1,6	7 31 28	31 59 51 N	double
α Pt Chien (Procyon) . . .	F ₅	0,5	7 36 44	5 21 7 N	double
β Gémeaux (Pollux)	K ₀	1,2	7 42 19	28 8 46 N	
ζ Poupe	O ₅	2,3	8 1 52	39 51 51 S	
α Lion (Régulus) . .	B ₈	1,3	10 5 46	12 12 27 S	triple
β Grande Ourse . .	A ₀	2,4	10 58 54	56 38 44 N	
α Grande Ourse . .	K ₀	1,9	11 0 43	62 0 57 N	
α Croix	B ₁	1,1	12 23 52	62 49 40 S	double
α Vierge (Epi) . .	B ₂	1,2	13 22 36	10 54 22 S	double
α Bouvier (Arcturus)	K ₀	0,2	14 13 25	19 26 12 N	
α Centaure	S ₀ K ₅	0,3 1,7	14 36 15	60 38 4 S	double
β Petite Ourse . .	K ₅	2,2	14 50 49	74 31 21 N	
α Couronne (la Perle)	A ₀	2,3	15 32 37	26 52 43 N	
α Scorpion (Antarès)	M ₀	1,2	16 26 24	26 19 30 S	double
α Ophiuchus	A ₅	2,1	17 32 39	12 35 39 N	
α Lyre (Véga) . . .	A ₀	0,1	18 35 17	38 44 13 N	
α Aigle (Altaïr) . .	A ₅	0,9	19 48 24	8 44 15 N	
α Cygne (Deneb) . .	A ₂	1,3	20 39 46	45 6 16 N	
α Céphée	A ₅	2,6	21 17 25	62 22 39 N	
β Pégase	M ₀	2,6	23 1 24	27 49 0 N	
α Pégase	A ₀	2,6	23 2 19	14 56 29 N	

CHAPITRE VIII

LES GALAXIES

- 1. La Galaxie.
- 2. Nébuleuses extragalactiques.

Je crois que ce serait un grand malheur, pour un astronome, que de manquer d'imagination.

Abbé LEMAITRE.

1

LA GALAXIE

■ 177. La Voie lactée. — Nous avons remarqué (n° 24), au cours d'une belle nuit claire, sans lune, la vaste luminosité qui doit son nom de *Voie lactée* à son aspect blanchâtre, comme si des gouttes de lait avaient été répandues dans le Ciel.

Elle occupe sensiblement un grand cercle de la sphère des fixes, passant par *Deneb* du *Cygne*, *Cassiopeé*, *Persée*, bordant *Orion*, *Sirius*, traversant le *Navire*, la *Croix*, le *Centaure*, bifurquant à la tête du *Scorpion* pour passer par le *Sagittaire* et l'*Aigle* d'une part, par *Ophiurus* d'autre part, les deux branches se rejoignant vers le *Cygne*. (Voir carte du Ciel, p. 104 et 105.)

Le pôle nord de ce grand cercle, sur la sphère des fixes, a pour coordonnées : $\alpha = 12\text{ h }40\text{ mn}$; $\delta = +28^\circ$, dans une région particulièrement pauvres en étoiles

GALILÉE, en 1609, vit à la lunette que la Voie lactée est formée de myriades d'étoiles distinctes. Les photographies modernes confirment cette découverte (fig. 203).

HERSCHEL, pendant de longues années, de 1775 à 1820, essaya de dénombrer les étoiles dans différentes direc-

tions. Il conclut à l'existence d'un vaste amas d'étoiles, de forme lenticulaire, assez aplati, à l'intérieur duquel se trouve

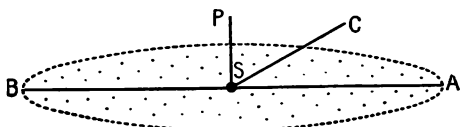


Fig. 202.

le Soleil. L'œil voit beaucoup d'étoiles dans les directions SA ou SB (fig. 202), contenues dans le plan galactique : c'est ce qui donne l'aspect de Voie lactée, sur le Ciel, aspect qui est donc un effet de perspective.

Les étoiles paraissent distinctes dans une direction telle que SC, et plus rares encore dans la direction SP du pôle galactique.



Photo comm. par M. Gentili. — Pic du Midi.

Fig. 203. — Une partie de la Voie lactée.

Cet amas d'étoiles s'appelle **la Galaxie**. Toutes les étoiles visibles à l'œil nu en font partie, mais aussi beaucoup d'autres.

■ **178. Inventaire de la Galaxie.** — Jusqu'en 1918, on en est resté aux conceptions d'HERSCHEL, admettant que le Soleil est au centre de la Galaxie. Depuis, la photographie et la spectrographie ont permis de préciser la structure de ce gigantesque amoncellement d'étoiles.

1^o Étoiles. — La Galaxie contient des milliards d'étoiles, de toutes tailles et de toutes classes. On peut les dénombrer dans certaines directions; dans d'autres, elles semblent si accumulées que leur distinction est impossible. Dans les constellations du *Scorpion* et du *Sagittaire*, les nuages d'étoiles sont particulièrement denses. La figure 203 représente un de ces nuages.



Photo observatoire de Haute-Provence.

Fig. 204. — Amas d'*Hercule*. Distance : 30 000 a-l.

2^o Amas. — Il existe des amas d'étoiles voisines les uns des autres. Les uns, comme les *Pléiades*, comprennent quelque 500 étoiles, dont une dizaine visibles à l'œil nu. Ils n'ont pas de forme caractéristique. Cet amas n'est qu'à 500 a-l du Soleil.

D'autres, comme l'amas d'*Hercule* (fig. 204), ont une forme globulaire et contiennent peut-être 100 000 étoiles.

Ces amas sont nombreux; SHAPLEY en a étudié une centaine, groupés aux environs du *Sagittaire*. Leur distribution est symétrique par rapport au plan galactique.

La présence de *Céphéides* dans ces amas fournit leur distance de l'ordre de 30 000 *a-l*, le diamètre d'un amas étant de 70 *a-l*.

3^e *Nébuleuses galactiques*

lumineuses. — On photographie, dans la Galaxie, des formations non résolubles en étoiles et qui ressemblent à des nuages lumineux.

a) La figure 205 est la photographie d'une nébuleuse, dite *Helix* d'après sa forme. Son spectre de raies brillantes l'apparente aux étoiles de classe O. On l'appelle une *nébuleuse planétaire*; mais c'est une dénomination impropre; il s'agit d'une *vraie étoile* dont l'atmosphère extrêmement développée, est due à une

émission permanente de matériaux gazeux par une photosphère



Photo comm. par P. Couderc.

Fig. 205. — La nébuleuse *Helix*.



Photo observatoire de Haute-Provence, comm. par P. Couderc.

Fig. 206. — Grande nébuleuse d'*Orion*.

très chaude, parfois à peine visible.

b) La figure 206 est la photographie de la nébuleuse d'*Orion*. Elle montre une forme très irrégulière. Son spectre d'émission contient les raies brillantes de l'hydrogène, de l'hélium, et des spectres d'étincelles d'ordre élevé.

Deux raies vertes ont été d'abord attribuées à un élément inconnu, qu'on a appelé *nébulium*; on sait maintenant qu'il s'agit de radiations émises par l'oxygène dans un état d'ionisation dû au vide très poussé des nébuleuses de ce type. Il s'agit de gaz très raréfiés, rendus fluorescents par les photons ultraviolets émis par des étoiles voisines très chaudes.

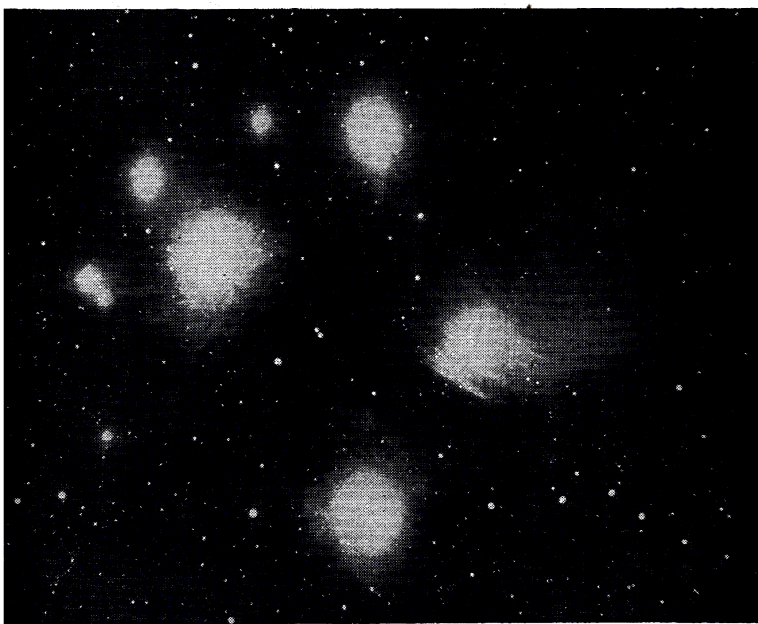


Fig. 207. — Nébuleuse des *Pléiades*.

c) La photographie (fig. 207) des *Pléiades* montre une autre sorte de nébuleuse dont le spectre est un spectre d'absorption. Ce sont des nuages de poussières fines qui diffusent la lumière des étoiles voisines, comme nous voyons les poussières de l'air éclairées dans un rayon de Soleil.

5° **Matière interstellaire.** — La figure 208 montre, dans la constellation d'*Orion*, un nuage obscur qui masque complètement ce qui est derrière lui. En haut du cliché, le profil curieux dit « la Tête de cheval ». Seules quelques étoiles particulièrement

brillantes arrivent à percer à travers ce brouillard opaque.

Ce nuage et d'autres analogues prouvent l'existence dans la Galaxie de matériaux cosmiques obscurs, poussières ou débris plus gros, dont la découverte donne bien du souci aux arpenteurs du Ciel. Quand il laisse apparaître les étoiles, le brouillard diminue leur magnitude apparente; elles paraissent donc plus lointaines qu'elles ne le sont, et il a fallu reviser les distances dans le sens d'une diminution. La correction à faire change avec la direction de la visée, car l'absorption de lumière dépend évidemment de

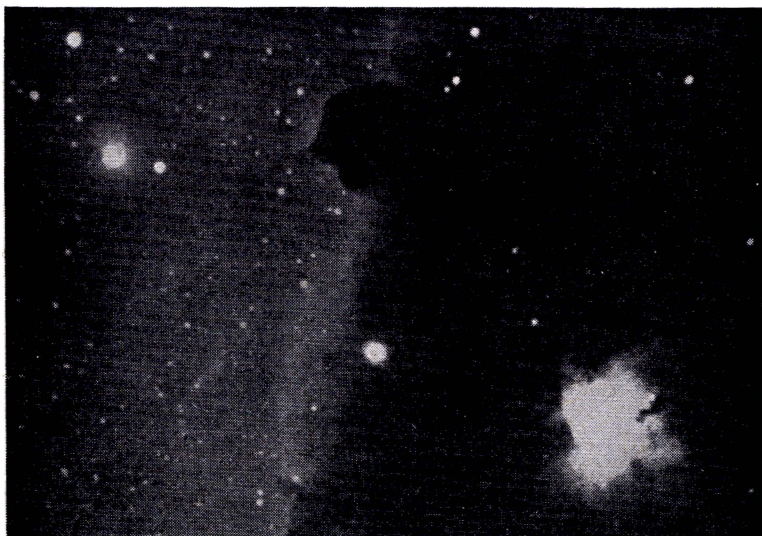


Photo comm. par P. Coudere.

Fig. 208. — Nébuleuse obscure : la *Tête de Cheval*.

l'épaisseur du nuage, faible dans la direction du pôle galactique et immense dans le plan galactique. On admet que, dans le plan galactique, l'absorption réduit les magnitudes de 0,4 à 0,6 par 1 000 *a-l.*, et bien plus encore dans la direction du centre.

Ces poussières ont aussi pour effet de rougir les étoiles lointaines, comme les poussières de l'atmosphère rougissent le Soleil couchant.

Nous avons vu (n° 150) que des météores ont pour origine des poussières appartenant au système solaire; peut-être en est-il qui proviennent de plus loin, dans la Galaxie.

Cet inventaire de la Galaxie, avec les mesures de distance corrigées de l'absorption, conduit actuellement aux conclusions suivantes :

La **Galaxie** est un disque d'environ 90 000 $a-l$ de diamètre. Son centre, situé vers le Sagittaire, forme un bulbe dont l'épaisseur dépasse 15 000 $a-l$. La Galaxie s'étale, en dehors du bulbe, en n'ayant plus que 3 000 $a-l$ d'épaisseur à l'emplacement du Soleil.

Le Soleil est à environ 30 000 $a-l$ du centre.

L'isolement du système solaire dans l'espace est donc un isolement relatif.

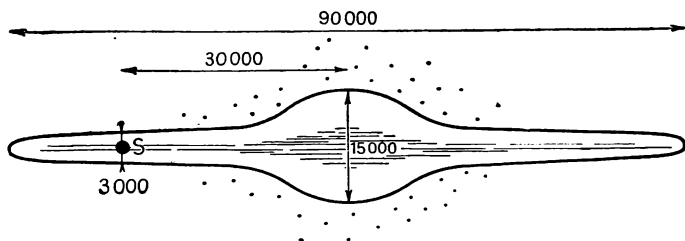


Fig. 209. — Coupe schématique de la Galaxie.
La position du Soleil est représentée; les cotes sont en $a-l$.

La coupe de la Galaxie peut être représentée par le croquis coté en $a-l$ de la figure 209. La matière obscure est particulièrement abondante dans le plan galactique.

On remarquera que la position du Soleil est bien loin d'être centrale.

Des amas globulaires, satellites de la Galaxie, ont été représentés par des points noirs, autour du bulbe.

■ **179. Rotation et masse de la Galaxie.** — Le fait que la Galaxie est un disque aplati, avec une masse centrale plus importante, fait penser à un système en rotation.

La détermination de ce mouvement (Oort, 1927) fut difficile. On sait que le Soleil a une vitesse propre de 20 km/sec, vers l'*apex*. C'est là un déplacement à l'intérieur de la Galaxie. La détermination des différences entre les vitesses radiales d'étoiles très lointaines et d'étoiles plus proches du centre a montré que toute la région qui contient le Soleil tourne autour du noyau central de la Galaxie avec une vitesse de 220 km/sec, la direction actuelle étant celle de *Céphée*.

Ainsi les étoiles qui constituent la Galaxie tournent autour du noyau central, comme les planètes autour du Soleil, en suivant la troisième loi de Képler. La vitesse de rotation diffère donc suivant la distance. Pour décrire son orbite autour de la Galaxie, le Soleil met 250 millions d'années. La Terre, âgée de quelque 4 milliards d'années, a donc fait déjà plusieurs fois le tour. Mais depuis Hipparque, l'arc parcouru atteint à peine 12".

Ce mouvement permet de déterminer la *masse totale* de la Galaxie : on l'évalue à **200 milliards de fois celle du Soleil**.

En comptant les étoiles dans des aires déterminées, on est arrivé à **30 milliards**. Mais il faut penser que nous ne voyons que la partie de la Galaxie située en avant du noyau par rapport au Soleil, que le noyau qui, à lui seul, contient peut-être la moitié des étoiles de la Galaxie, est masqué en partie par de la matière interstellaire. On peut donc multiplier par **4** le nombre précédent : il accuse encore un déficit important par rapport à la masse totale. Il faut attribuer ce déficit à la matière interstellaire, nuages de gaz et de poussières, qui doit représenter environ un tiers ou la moitié de la masse totale.

◀ LECTURE ▶

■ **180. Quelques recherches actuelles.** — 1° Le nuage de poussières du plan galactique étant bien gênant pour l'observation, on a eu l'idée (STEBBINS, 1947) de procéder à une exploration en ondes infrarouges, qui traversent les poussières. En effet, un nuage de poussières arrête les radiations lumineuses du Soleil mais n'arrête pas les radiations calorifiques : dans le vent de sable du Sahara, on ne voit plus le Soleil, mais la température reste fort élevée.

Ces recherches, commencées à l'aide de cellules photo-électriques, sont continuées actuellement à l'observatoire de Haute-Provence, grâce à l'emploi de films ou plaques sensibles aux rayons infra-rouges de 0,8 à 0,89 μ , associés à des filtres qui arrêtent les rayons plus courts. On procède ainsi à de véritables sondages dans toutes les directions de la Galaxie. On en conclut que la *région du Sagittaire* est d'une activité extraordinaire, et que, là où l'œil ne voit rien, même au télescope, il faut admettre l'existence d'une grande concentration d'étoiles, masquées par les nuages obscurs.

2° L'observation au radiotélescope a fait découvrir dans la Galaxie des émissions d'ondes hertziennes. Leur maximum d'intensité correspond au centre de la Galaxie.

En particulier, une émission de 21 cm de longueur d'onde est produite par l'hydrogène neutre quand son électron change le sens de sa rotation. Cette émission, découverte en 1951, a permis de dénoter la présence de spires et de les suivre derrière le centre de la Galaxie. Ces émissions, non absorbées par les poussières, permettent des sondages bien plus profonds que la lumière.

2

NÉBULEUSES
EXTRAGALACTIQUES

■ 181. Nébuleuse d'Andromède. — Par une belle nuit, on peut observer, assez près de l'étoile β d'Andromède, une petite nébulosité, dans la direction du Nord par rapport à β . Elle est visible à l'œil nu et, sur d'anciennes cartes du Ciel, on la désignait sous le nom « d'étoile nébuleuse ».

En 1924, de bonnes photographies prises au Mont Wilson par

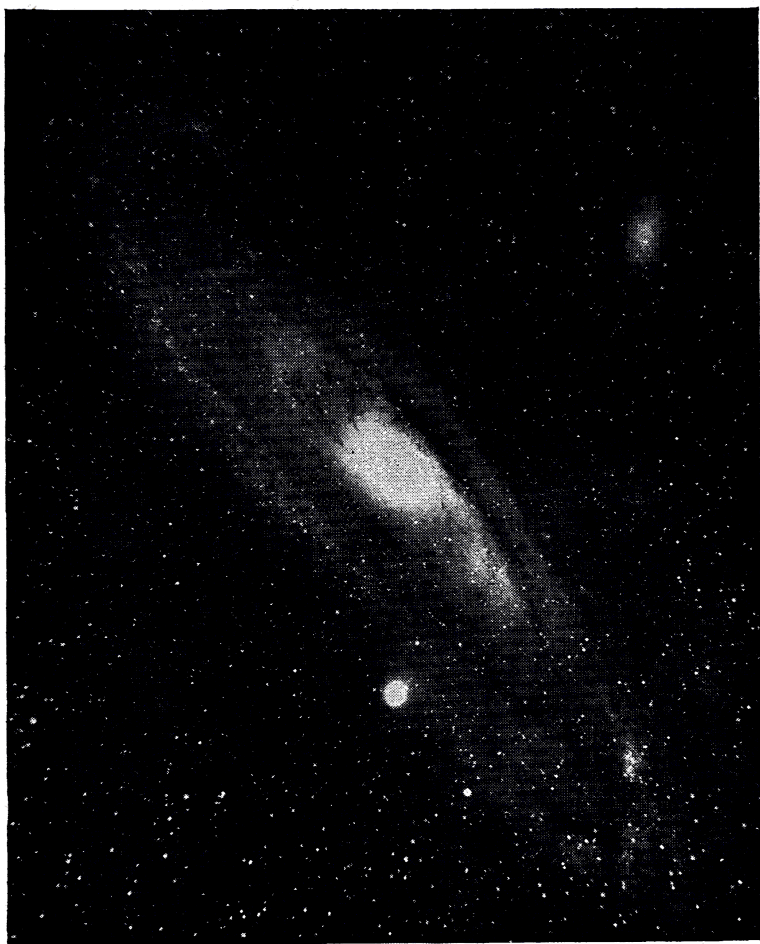


Fig. 210. — La nébuleuse d'Andromède.

HUBBLE, ont montré cette nébuleuse sous l'aspect que donne la figure 210. Une vaste ellipse apparaît, bourrée d'étoiles, avec au centre un amoncellement de grande luminosité. Des traînées de matières obscures semblent la diviser en bras. Elle est accompagnée d'amas, analogues aux amas qui accompagnent la Galaxie.

Deux amas sont visibles sur le cliché; mais on en connaît 250.

Le spectre donné par cet ensemble est analogue à celui du Soleil.

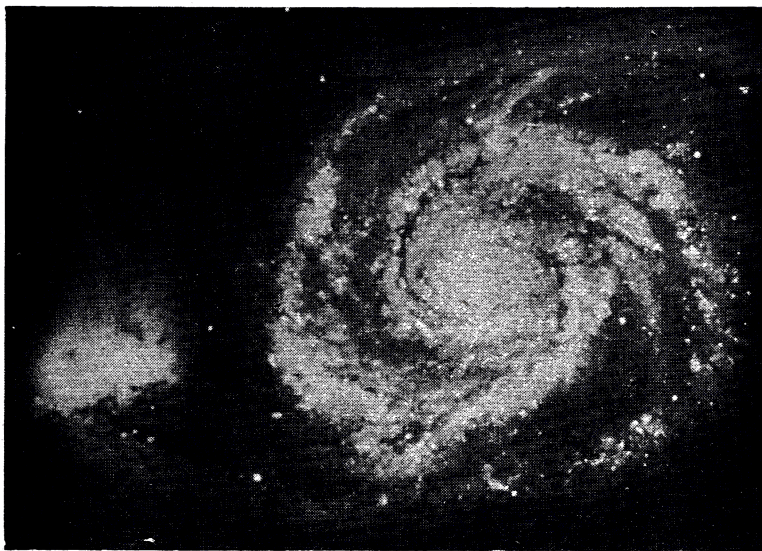


Photo Observatoire du Mont-Wilson.

Fig. 211. — La nébuleuse spirale des *Chiens de Chasse*.

Sa distance a été évaluée par HUBBLE à 750 000 *a-l.* A la suite d'observations faites par BAADE (1951) au Mont Palomar, il semble que cette distance doive être plutôt évaluée à 2 000 000 *a-l.*

Il résulte de sa distance et de son diamètre apparent que sa plus grande dimension est presque double du diamètre de la Galaxie.

En 1939, on a pu établir la rotation de cette nébuleuse et en déduire la masse, de l'ordre de 100 milliards de fois celle du Soleil.

En 1950, des ondes émises par son centre ont été reçues au radiotélescope.

En somme, on se trouve en présence d'un ensemble tout à fait comparable à la Galaxie, vu de trois quarts, et probablement plus étendu. Les deux ensembles sont de même modèle.

Sa distance le met nettement en dehors de la Galaxie. Nous concluons que *c'est une autre galaxie*, ayant les mêmes aspects, et vue, cette fois, de l'extérieur.

■ 182. Les galaxies. — L'exploration du Ciel par le grand télescope (2,5 m) du Mont Wilson a permis, depuis une trentaine d'années, de découvrir un nombre impressionnant de nébuleuses en dehors de la Galaxie. Les unes sont vues de face, et la figure 211 montre une nébuleuse, dans les *Chiens de Chasse*, dont on dis-



Photo Ritchey-Mont-Wilson, comm. par P. Coudere.

Fig. 212. — Nébuleuse spirale de la Chevelure de Bérénice.

tingue les bras spiralés s'écartant de l'amas central. Des super-géantes sont visibles le long des bras. Sa distance est de 4 millions d'a-l environ.

D'autres sont vues de profil, comme la nébuleuse de la *Chevelure de Bérénice* (fig. 212), où l'on voit nettement, bien qu'à 7 millions d'a-l, le bulbe central et le plan de matière obscure qui a l'air de la couper en deux. La ressemblance avec ce que nous avons dit de la Galaxie est frappante.

La forme *spiralée* est extrêmement répandue. Nous sommes mal placée pour voir les spires de notre Galaxie, mais elle n'échappe pas à cette structure, mise en évidence par la radioastronomie (n° 180, 2°).

Il existe cependant d'autres nébuleuses résolubles en étoiles,

situées en dehors de la Galaxie, et qui ne sont pas spiralées. Il en est qui ont la forme d'un *ellipsoïde* : la figure 213 montre une



Photo observatoire de Haute-Provence, comm. par Les Presses Universitaires.

Fig. 213. — Ellipsoïde et Spirales.

nébuleuse ellipsoïdale et deux spirales; il en est de tout à fait irrégulières, comme les *Nuages de Magellan*, voisins et satellites de notre Galaxie (fig. 214).

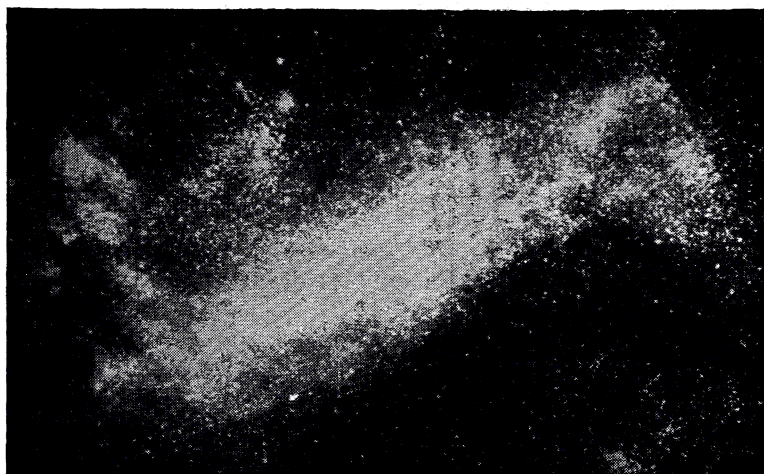


Photo observatoire Harvard, comm. par Les Presses Universitaires.

Fig. 214. — Grand nuage de Magellan.

- On donne le nom général de **galaxies** à toutes les nébuleuses résolubles en étoiles.

Leur spectre est analogue à celui du Soleil. HUBBLE a pu, avec le télescope de 2,5 m, le plus puissant jusqu'à ces dernières années, sonder l'Univers extragalactique jusqu'à plus de 500 millions d'années-lumière.

Il utilisa, pour trouver les distances, les *céphéides*, puis les *supergéantes*, ce qui lui permit d'évaluer les distances jusqu'à 10 millions d'a-l.

Vers 8 millions d'a-l il découvrit, dans la constellation de la Vierge, un *amas* de plus de 3 000 galaxies. Il détermina la magnitude absolue *totale* d'une spirale, prise parmi les moyennes; il put alors déterminer les distances des spirales plus lointaines en comparant leur éclat total à celui de l'étalon qu'il avait choisi.

Dans l'immense espace exploré, des millions de galaxies forment des groupes dont les galaxies seraient à moins de deux millions d'a-l les uns des autres; les distances entre deux groupes, ou *amas* de galaxies sont bien plus considérables.

Notre Galaxie formerait, avec les deux nuages irréguliers de Magellan qui semblent lui être liés, la nébuleuse d'Andromède, celle du Triangle et une douzaine d'ellipsoïdes, l'un de ces groupes dit *groupe local*.

Les travaux poursuivis par BAADE, au Mont Palomar, ont montré que les distances évaluées par HUBBLE devaient être multipliées au moins par 5, peut-être par 7 ou 8. Le peuplement de l'espace en galaxies semble homogène dans toutes les directions.

■ **183. Déplacement des galaxies.** — En étudiant le spectre des galaxies, en dehors du groupe local, on avait remarqué chez toutes un décalage des raies H et K, particulièrement nettes, vers le rouge, indiquant ainsi une vitesse d'éloignement.

Le grand spécialiste HUBBLE, après ses déterminations de distances, put mettre en évidence que les vitesses de fuite ainsi observées sont proportionnelles à la distance.

Les nombres obtenus ont d'abord paru fantastiques, car on trouvait des vitesses de plusieurs milliers de km/sec. Il fallut se soumettre à des faits bien contrôlés, et admettre la loi suivante (HUBBLE et HUMASSON) :

→ Les galaxies s'éloignent de nous à une vitesse V proportionnelle à leur distance d .

On admet aujourd'hui :

$$V = 25 d.$$

Dans cette formule, V est en km/sec; d en millions d' $a-l$.

On peut utiliser le parsec (3,26 $a-l$) et on obtient :

80 km/s par mégaparsec (million de parsecs).

Ce résultat concerne tous les types de galaxies et toutes les directions du ciel, visibles du Mont Palomar. Il vaut pour les deux hémisphères célestes.

Il a été confirmé par les mesures de vitesses radiales de galaxies distinctes appartenant au même amas : huit galaxies de l'amas situé dans la Couronne boréale ont des vitesses radiales concordantes.

Les vitesses sont mesurables à 1 ou 2 % près. Les déterminations des distances sont malheureusement moins assurées surtout quand il s'agit d'objets très lointains pour lesquels on manque d'objets de comparaison dont les magnitudes soient sûres. Cependant, les résultats peuvent être considérés comme approchés à 20 ou 30 % près.

Le record des vitesses de fuite a été obtenu en 1958, par BAUM, avec 125 000 km/sec. La distance correspondante serait :

$$\frac{125\,000}{25} \neq 5 \text{ milliards d}'a-l.$$

Si cette loi se confirme pour de plus grandes distances, à la distance $d = \frac{300\,000}{25} \neq 12$ milliards d' $a-l$, la vitesse sera égale à celle de la lumière. La lumière des galaxies fuyant avec cette vitesse ne pourra nous parvenir, et quelle que soit la puissance des télescopes, cette distance marquera la borne de *l'univers observable*.

■ **184. Matière interstellaire.** — 1° Nous avons vu (p. 225) qu'entre les étoiles s'étendent des nuages de gaz et de poussières. La présence, sur les clichés des galaxies les plus proches, de bandes obscures dénote l'existence de matériaux analogues à l'intérieur de chaque galaxie.

La matière interstellaire n'est pas uniformément répandue dans une galaxie; elle abonde dans le plan galactique; mais il existe des fenêtres claires, des nuages opaques, des brouillards plus ou moins denses, de sorte que l'absorption de la lumière des étoiles est irrégulière. Les astronomes sont appris à en tenir compte dans les évaluations de distances. Depuis 1930, ils ont été amenés à

réduire la plupart des distances intragalactiques évaluées précédemment.

Sur les spectres des étoiles géantes de classe B, qui n'ont que quelques raies, on voit souvent des raies fines dues aux atomes répandus dans le vide intersidéral. Ces raies sont dites *stationnaires* car elles ne participent pas au déplacement lié au mouvement propre de l'étoile. Elles montrent la présence de calcium, de sodium, de fer, de titane, de molécules hydrocarbonées et de cyanogène. C'est une sorte d'analyse spectrale de la matière interstellaire qu'elles permettent de faire, mais bien incomplètement. Il y a certainement de l'hydrogène et de l'hélium, mais les raies stationnaires ne les décèlent pas.

Les gaz, résidus de la formation des étoiles, prédominent largement. Leur masse totale est sensiblement la même que celle des étoiles dans la galaxie. Pourtant, leur densité est extrêmement faible; dans notre région, elle ne dépasse pas celle qui serait réalisée par la présence de 2 atomes d'hydrogène par cm^3 . Dans les nuages, elle peut atteindre celle de 50 atomes par cm^3 . (OORT.)

La masse totale des fumées n'atteint pas le centième de celle des gaz; mais ce sont elles qui absorbent. Leur action sur la lumière montre qu'elles sont formées de particules fines, de $0,2\ \mu$ de diamètre environ.

2° On doit se demander si, entre les galaxies, il existe un milieu analogue, qui contraindrait à reviser les distances dans des proportions sensibles.

Depuis la mise en service du télescope du Mont Palomar, on a mis en évidence l'existence de tels matériaux; des traînées relient des galaxies voisines, comme si elles en avaient été arrachées par un effet de gravitation. On a vu aussi des débris de galaxies, des galaxies naines et des étoiles isolées.

L'inventaire est encore bien incomplet, mais l'existence de matériaux entre les galaxies est du moins certaine. Les distances devront sans doute encore être revisées, quand on pourra tenir compte de l'absorption due à ces matériaux.

◀ LECTURE ▶

■ 185. **L'expansion de l'Univers.** — Nous sommes maintenant trop bien guéris de l'illusion d'être au centre du Monde pour ne pas être inquiets à la pensée que l'Univers nous fuit, ce qui est encore un anthropocentrisme à rebours.

On échappe à cette objection en pensant à une bouffée de fumée qui se dilate. Un observateur attaché à l'une des molécules de fumée verrait toutes les autres molécules le fuir, au cours de l'expansion de la bouffée. C'est donc une expansion de l'espace, entraînant les galaxies, qui nous est suggérée par cette image.

En 1927, l'abbé LEMAITRE, professeur à l'université de Louvain, cherchait un modèle d'espace compatible avec les théories relativistes d'EINSTEIN. Il montra que l'Univers devait se dilater. La matière qui le compose serait soumise à deux forces antagonistes : l'attraction newtonienne et la répulsion cosmique. Si des matériaux sont suffisamment voisins, c'est l'attraction newtonienne qui l'emporte; cela fait de chaque galaxie un ensemble cohérent. Si des galaxies sont voisines, les deux systèmes de forces peuvent s'équilibrer, et cela se produirait dans les groupes de galaxies dont nous avons signalé l'abondance et cité deux échantillons : le *groupe local* et celui de la *Vierge*, et signalé l'abondance.

Si les galaxies, ou les groupes de galaxies, sont suffisamment éloignés, c'est la répulsion cosmique qui l'emporte et les galaxies se fuient comme les molécules d'un gaz en expansion.

Cette théorie, reposant sur des calculs difficiles, resta d'abord sans écho. Mais la découverte de HUBBLE attira sur le mémoire de LEMAITRE l'attention du grand astronome et théoricien anglais EDDINGTON. L'observation confirmait la théorie.

Ainsi l'Univers serait en expansion.

Les conséquences de cette théorie vont loin. Il est évident que si l'Univers se dilate, il devait être, dans le passé, plus concentré.

Un mobile marchant à la vitesse de 25 km-sec. mettrait 12 milliards d'années pour parcourir la distance d'un million d'*a-l.* Les galaxies devaient donc être réunies il y a 12 milliards d'années environ. L'attraction newtonienne pouvait être dominante et rassembler toute la matière — et par suite l'énergie — en un ensemble unique, d'une masse formidable. Un tel ensemble ne pouvait être stable, par suite de pressions énormes à l'intérieur; il a dû engendrer dans sa masse des réactions nucléaires dont nous commençons à avoir la notion, exploser et projeter en tous sens les éléments qui le composaient.

Comme des bouffées de gaz après une explosion, les matériaux se sont dispersés, se groupant un peu au hasard, et formant des galaxies en giration, à l'intérieur desquelles l'attraction newtonienne exerce son action.

Or, d'après les estimations concordantes des géologues et des chimistes qui étudient les radiations des minéraux, l'âge de la Terre est sensiblement de 5 milliards d'années. Celui des amas globulaires est estimé à 6 milliards d'années. Ces nombres sont compatibles avec les précédents.

Ainsi les conceptions de l'abbé LEMAITRE rejoignent les observations de HUBBLE et celles des géophysiciens en une grandiose synthèse, que nous ne saurions mieux résumer que par une phrase de son auteur :

« L'évolution du monde peut être comparée à un feu d'artifice qui vient de se terminer. Debout sur une escarille mieux refroidie nous voyons s'éteindre doucement les soleils, et cherchons à reconstituer l'éclat disparu de la formation des mondes. »

Bien entendu, il ne faut retenir de cela qu'une hypothèse géniale, en accord *actuel* avec certains faits observés, et qui peut être génératrice, comme toute hypothèse féconde, de nouvelles observations, jusqu'à ce que les faits la confirment, l'infirmement, ou appellent à la modifier. C'est la tâche passionnante, et toujours inachevée, des astronomes et de tous ceux qui se consacrent à la recherche scientifique.

Concluons par cette phrase de Louis de BROGLIE : « Les savants sont bien hardis de vouloir reconstruire par la pensée des portions du plan de l'univers : la grande merveille, c'est qu'ils y ont parfois réussi ».

TABLEAU DES ABRÉVIATIONS EMPLOYÉES

Hauteur d'un astre :	h	} coordonnées horizontales.
Distance zénithale :	z	
Azimut :	a	
Angle horaire :	H	} coordonnées horaires.
Déclinaison :	δ	
Ascension droite :	α	} coordonnées équatoriales.
Déclinaison :	δ	
Longitude :	L	} coordonnées géographiques.
Latitude :	φ	
Longitude céleste :	θ	} coordonnées écliptiques.
Latitude céleste :	λ	
Kilomètre :	km	} unités de longueurs employées dans ce volume.
Micron :	μ	
Rayon équatorial terrestre :	R	
Unité astronomique :	UA	
Année-lumière :	$a-l$	
Parsec :	ps	
Temps sidéral :	T	} ces temps sont des angles horaires.
Temps vrai :	t_v	
Temps solaire moyen :	t_m	
Temps universel :	TU	
Parallaxe annuelle des étoiles :	ϖ	
— de la Lune :	P	
— du Soleil :	p	
Unités de temps moyen :	jour solaire moyen : j ; heure : h ; minute : m ; seconde : s .	

NOMBRES À RETENIR

(Valeurs moyennes)

TERRE	Quart du méridien terrestre :	≠	10 000 km
	Arc de 1° du méridien :		111,111 km
	— 1 minute (mille marin) :		1,852 km
	Rayon équatorial		6,300 km
	Aplatissement terrestre :		$\frac{1}{297}$
	Année julienne :		365,25 j.
	Année tropique :		365,2422 j.
SOLEIL	Diamètre apparent (moyen) :		32'
	Rayon :		109 R.
	Distance moyenne à la Terre :		23 400 R.
	Rotation (moyenne) :		25 j.
LUNE	Diamètre apparent (moyen) :		31'
	Rayon :		$\frac{3}{11}$ R.
	Distance moyenne à la Terre :		60 R.
	Lunaison ou révolution synodique :		29,5 j.
	Saros :		18 ans 11 j. 8 h.

PLANÈTES

Nombres de Bode : $a = 0,4 + 0,3 \times 2^{n-1}$									
0,4	0,7	1	1,6	2,8	5,2	10	19,2	38,4	
Distances au Soleil :									
0,39	0,72	1	1,52	<i>Petites</i>	5,2	9,55	19,2	30,1	
<i>Mercure; Vénus; Terre; Mars; Planètes; Jupiter; Saturne; Uranus; Neptune.</i>									

ÉTOILES

Distance de l'étoile la plus proche du Soleil : 4,3 a-l.
 $1 \text{ ps} = 3,26 \text{ a-l.}$ $1 \text{ a-l.} \neq 10^{13} \text{ km.}$

Diamètre de notre Galaxie : 90 000 a-l.

Distance de la Galaxie voisine : 2 000 000 a-l.

Relation entre magnitudes :

$$M = m + 7,57 - 5 \log d \quad (d \text{ en a-l.})$$

PROBLÈMES

proposés au Baccalauréat.

73. — La hauteur du pôle au-dessus de l'horizon d'un lieu est 45° , la déclinaison d'une étoile est δ et $\sin \delta = \frac{\sqrt{3}}{3}$. Pendant quelle fraction du jour sidéral l'étoile est-elle visible en ce lieu?

74. — Un observateur, situé sur une montagne à proximité de la mer, regarde l'horizon, c'est-à-dire la ligne de démarcation du ciel et de la mer. Sachant que l'altitude de l'observateur au-dessus de la mer est $h = 1$ kilomètre, calculer :

1° La distance d de l'observateur à sa ligne d'horizon;

2° L'angle α que fait la verticale en un point de cette ligne avec celle de l'observateur.

N. B. — On supposera la mer parfaitement calme et la Terre sphérique. On calculera le rayon terrestre R en partant de la signification du mètre et en prenant $\pi = 3,1416$. On calculera R et d en kilomètres et à un kilomètre près, c'est-à-dire sans donner de décimales, et α en degrés et minutes sexagésimales, à une minute près. On indiquera sur la copie le détail des opérations arithmétiques.

75. — Deux montagnes ayant, l'une 1 200 mètres d'altitude et l'autre 2 000 mètres, sont dans deux îles voisines. La distance de leurs sommets est de 36 kilomètres. Sachant que du sommet de l'une on voit celui de l'autre émerger juste au-dessus de l'horizon, on demande quel est le rayon de la Terre supposée sphérique.

76. — Pour un lieu situé à 43° de latitude, calculer, à midi vrai, le jour des solstices d'été et d'hiver, l'ombre portée sur un plan horizontal par un bâton vertical de 3 mètres de hauteur. On fera le calcul à un centimètre près.

77. — Deux points A et B appartiennent au même parallèle terrestre. L'arc AB de ce parallèle a une longueur de 100 kilomètres et l'heure locale de B avance de 4 minutes sur celle de A. Calculer la latitude de ces deux points.

78. — On admettra, à titre d'approximation, que le mouvement de la planète Mercure autour du Soleil est circulaire uniforme, et qu'il s'effectue dans le plan de l'orbite terrestre. La distance de la Terre au Soleil étant prise pour unité, on adoptera 0,39 pour la distance de Mercure au Soleil, et l'on supposera qu'à l'instant $t = 0$ le Soleil, Mercure et la Terre sont en ligne droite.

1° Quelle est en jours (terrestres) la durée de la révolution de Mercure autour du Soleil?

2° Calculer en fonction du temps t la tangente de l'angle Mercure-Terre-Soleil.

3° Quel est le maximum de cet angle?

79. — La latitude φ d'un lieu est donnée par la relation :

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{5}{4}.$$

a) Entre quelles limites est comprise : 1° la déclinaison des étoiles toujours visibles en ce lieu; 2° la déclinaison des étoiles qui se lèvent et se couchent en ce lieu; 3° la déclinaison des étoiles toujours invisibles en ce lieu?

b) Quelle est la déclinaison de l'étoile qui passe au zénith du lieu et à laquelle des 3 catégories précédentes appartient-elle?

c) La déclinaison δ du Soleil est donnée un certain jour par la relation $\operatorname{tg} \delta = \frac{2}{5}$; quel est ce jour-là la durée du jour et de la nuit au lieu considéré?

Les angles seront évalués en degrés, minutes et secondes.

80. — Un aviateur s'élève à 6 kilomètres au-dessus d'un terrain horizontal. On demande de calculer :

1° la dépression de l'horizon sensible pour cet aviateur;

2° la mesure en kilomètres carrés de la portion de surface terrestre supposée sphérique qu'il peut apercevoir. On prendra 6 300 kilomètres pour valeur approchée du rayon terrestre.

81. — On admettra comme approximation que le Soleil et les planètes se réduisent à des points géométriques, que les planètes décrivent dans un même plan, avec des mouvements uniformes et dans le même sens, des circonférences ayant pour centre le Soleil, et que les rayons des circonférences décrites par Mercure, Vénus et la Terre sont représentés par les trois nombres 0,4, 0,7 et 1.

1° Dédire de la troisième loi de Képler les durées des révolutions de Mercure et de Vénus autour du Soleil, en prenant comme unité de temps la durée de la révolution de la Terre : on calculera deux chiffres significatifs. Quelles sont, avec la même unité de temps et en valeurs approchées, les vitesses angulaires de Mercure et de Vénus dans leur mouvement autour du Soleil? Quels sont les vitesses linéaires de la Terre, de Mercure et de Vénus, si l'on prend pour unités le kilomètre et la seconde, et si l'on admet que la distance de la Terre au Soleil et la durée de sa révolution sont respectivement 15×10^7 et 3×10^7 ?

2° Sur la sphère céleste qui a pour centre la Terre, montrer que la distance angulaire d'une planète inférieure au Soleil ne peut dépasser une certaine valeur dont on donnera le sinus pour Mercure et pour Vénus. T désignant la durée de révolution d'une planète inférieure, et la durée de révolution de la Terre étant encore prise pour unité, calculer l'intervalle de temps qui s'écoule entre une conjonction inférieure et une conjonction supérieure consécutives de la planète considérée : appliquer à Mercure et à Vénus.

82. — La distance de la Terre au Soleil étant prise pour unité, la distance de la planète Vénus au Soleil est représentée par le nombre : 0,723. On suppose que les orbites sont circulaires et que l'année sidérale est composée de 365,25 jours moyens. On demande :

1° de calculer la révolution sidérale de Vénus;

2° de calculer sa révolution synodique (intervalle de temps entre deux conjonctions);

3° de calculer sa distance angulaire au Soleil quand elle est également éloignée du Soleil et de la Terre;

4° de déterminer son diamètre apparent quand la partie éclairée est vue sous forme d'un demi-cercle, sachant que ce diamètre est $1'6''7$ quand elle est en conjonction inférieure.

83. — En un lieu A de l'hémisphère nord, on mesure à midi, vers le solstice d'été, 20 juin, la longueur d'ombre AC d'un mât vertical AB; et, vers le solstice d'hiver, 20 décembre, la longueur d'ombre AD.

En désignant respectivement les angles CBA, DBA par B et B', on demande d'exprimer la latitude du lieu, φ , et l'inclinaison de l'écliptique sur l'équateur, E, à l'aide des angles B et B'. On supposera le Soleil réduit à son centre et on négligera les effets de réfraction et de parallaxe.

Application numérique : AB = 20 m; AC = 8,821 m; AD = 57,111 m.

84. — En un lieu terrestre, de latitude Nord φ , on mesure l'ombre portée BC, par le style vertical AB, à midi vrai, instant du passage du Soleil au méridien. Cela posé, on demande :

1° l'expression de BC, en fonction de AB : a) aux équinoxes; b) aux solstices;

2° quelle doit être la déclinaison du Soleil pour que l'ombre BC soit : a) égale à AB; b) le double de AB;

3° combien de fois et en quelles saisons ces phénomènes peuvent se produire. Appliquer à Besançon, dont la latitude $\varphi = 47^{\circ}15'$, avec un style AB de 5 mètres;

4° Si l'on déplace le style AB, le long d'un méridien, peut-on rencontrer des zones terrestres où l'ombre de AB soit nulle? ou infiniment grande? Discuter. On supposera le Soleil réduit à un point lumineux et on prendra, pour l'inclinaison de l'écliptique sur l'équateur, la valeur $23^{\circ}27'$.

85. — Un certain jour lorsqu'il est midi vrai en un lieu A, la déclinaison du Soleil est $21^{\circ}16'33''$. On demande pour ce même jour : 1° la hauteur du Soleil à midi vrai au-dessus de l'horizon du lieu A qui a pour latitude $50^{\circ}38'44''$; 2° quels sont les points de la Terre qui voient passer le Soleil à leur zénith.

86. — On suppose la Terre parfaitement sphérique et telle que la longueur d'un arc de grand cercle soit égale à 40 000 kilomètres.

1° Quel est, dans le mouvement diurne accompli autour de la ligne des pôles, l'espace parcouru par un point de l'équateur terrestre en une seconde de temps sidéral?

2° Quels sont les lieux géographiques terrestres pour lesquels un point parcourt, pour la même cause et dans le même espace de temps :

a) 424,7 mètres,

b) 184,3 mètres?

3° Quel est l'espace parcouru dans les mêmes conditions par un point situé sur le parallèle de Besançon, ayant pour latitude nord $47^{\circ}15'0''$?

4° Quelles sont les distances zénithales du centre du Soleil, à Besançon, aux équinoxes, mars-septembre, et aux solstices, juin-décembre, sachant que l'inclinaison de l'écliptique sur l'équateur est d'environ $23^{\circ}27'0''$?

5° Mêmes questions pour les points du parallèle terrestre de l'hémisphère nord parcourant 184,3 mètres à la seconde?

87. — La Terre et la planète Vénus sont supposées décrire des cercles dans le même plan, suivant les lois de Képler. On considérera un cercle comme une ellipse ayant ses axes égaux et ses foyers confondus avec le centre. La distance de la Terre au Soleil, centre commun des deux cercles, étant égale à 1, celle de Vénus au Soleil est égale à 0,723. La durée de la révolution de la Terre est 365 jours.

1° Calculer la durée de la révolution de Vénus.

2° A la date du 1^{er} janvier 1921, la Terre et Vénus sont en conjonction (c'est-à-dire en ligne droite avec le Soleil et du même côté). Calculer la date de la conjonction suivante.

3° Étudier, en fonction du temps, la variation de la distance de Vénus à la Terre.

88. — Trouver le temps qui s'écoule entre deux oppositions consécutives de la planète Mars en admettant que la Terre et Mars décrivent uniformément deux cercles concentriques situés dans le même plan, la première en $366^{\circ}16'9''$, l'autre en $686^{\circ}23'31''$.

89. — Connaissant la latitude φ d'un lieu et la déclinaison δ du Soleil à une époque donnée :

1° Calculer la durée de la nuit à cette époque et en ce lieu. On supposera le Soleil immobile dans la durée d'une journée et réduit à un point infiniment éloigné. On négligera l'effet de la réfraction et du crépuscule.

2° Montrer que l'extrémité de l'ombre portée par une tige verticale sur le plan horizontal du lieu décrit, dans le cours d'une journée, une courbe du genre ellipse, hyperbole ou parabole. Discuter.

3° Étant donnée la hauteur h de la tige au-dessus du plan horizontal et se plaçant dans le cas où la courbe décrite par l'extrémité de l'ombre est une ellipse, calculer les axes de cette ellipse.

90. — Soit S, T, M le Soleil, la Terre et la planète Mars supposés réduits à leurs centres; on admettra que les orbites de T et de M autour de S sont circulaires dans un même plan, et l'on désignera par T_1 et T_2 les durées de révolutions sidérales de la Terre et de Mars.

1° Calculer le rapport des vitesses linéaires de M et de T sur leurs orbites, en supposant

$$T_1 = 365,25 \text{ j}, \quad T_2 = 686,98 \text{ j}.$$

2° Les positions de M et de T étant supposées connues à un instant donné, construire géométriquement la vitesse de M *par rapport* à T.

3° Le 23 août 1924, à 17 h, M et S étaient en ligne droite avec T, de part et d'autre de la Terre (opposition). Calculer l'angle $\theta = \text{MST}$ à un instant t compté à partir de l'opposition.

4° Trouver la valeur de θ quand la Terre est équidistante du Soleil et de Mars et en déduire le calcul numérique de la prochaine date où ce phénomène aura lieu.

91. — Calculer le demi-grand axe de l'orbite de Mercure en prenant pour unité de longueur le demi-grand axe de l'orbite terrestre. On sait que la révolution de Mercure dure 88 jours moyens.

92. — On considère le Soleil S et une plaine terrestre PP' parfaitement plane. A un certain moment, la Lune vient passer entre le Soleil et cette plaine, plaine que l'on regardera comme immobile pendant la durée du passage. On assimile à une portion de ligne droite QQ' l'arc que décrit alors le centre L de notre satellite; en outre, on suppose QQ' parallèle à la plaine PP' et le plan QSQ' perpendiculaire à son sol suivant PP'.

1° A quel genre d'éclipse de Soleil pourra-t-on assister sur PP'? Connaissant le rayon R du Soleil, les distances $SH = a$, $SK = b$ de son centre à PP' et à QQ', trouver l'inégalité à laquelle doit satisfaire le rayon r de la Lune pour que l'éclipse vue soit ou totale, ou annulaire.

2° Connaissant de plus r et la distance $SL = d$ des centres du Soleil et de la Lune, calculer l'aire de la tache d'ombre ou d'annularité formée sur la plaine. Écrire immédiatement le résultat pour le cas où on aurait $r = R$.

93. — 1° On coupe un cône de révolution de sommet S, d'axe SX et de demi-angle au sommet α , par un plan P rencontrant l'axe SX en I. On pose : $SI = d$; θ est l'angle de SI et de P. Étudier la nature de la section du cône par le plan. Calculer les éléments de cette section : longueur des axes, distance focale, excentricité, angle des asymptotes s'il y a lieu, et paramètre si la section est une parabole.

2° Variation de l'axe focal quand θ restant fixe, α varie.

3° En un lieu M de latitude $\varphi = 48^\circ$, un mur vertical est perpendiculaire au plan du méridien de M. Sur la face de ce mur exposée au Sud, en un point I de la verticale de M, on fixe une tige matérielle IS parallèle à l'axe du monde, de longueur $d = 1$ m. Déterminer l'ombre projetée par S sur le mur le jour du solstice d'été. Inclinaison de l'écliptique $23^\circ 27'$.

94. — 1° En un lieu A de latitude φ , une tige AB est dressée verticalement. On suppose que, pendant la durée d'un même jour, la déclinaison du Soleil conserve une valeur constante δ . Montrer que le rayon lumineux joignant le Soleil au point B décrit un cône de révolution, dont on préciserà l'axe et le demi-angle.

2° Montrer que la courbe (C) décrite par l'ombre M du point B sur le plan horizontal de A est une conique d'excentricité :

$$e = \left| \frac{\cos \varphi}{\sin \delta} \right|.$$

Discuter le genre de cette conique en fonction de φ , δ étant fixe. Qu'arrive-t-il si $\varphi = \delta = 0$?

3° On prend $\varphi = 43^\circ 36' 44''$ et $\delta = 23^\circ 25'$, $AB = 3,5$ m. Calculer la longueur de l'ombre à midi.

4° δ ayant la valeur donnée au 3°, quels sont les points de la Terre qui voient passer le Soleil à leur zénith? Quels sont les points de la Terre pour lesquels le Soleil ne se couche pas?

INDEX ALPHABÉTIQUE

(Les numéros renvoient aux paragraphes.)

A

Aberration des étoiles	71
Aérolithes	150
Aigle	24
Aldebaran	24, 170
Algol	23, 171
Altair	24
Amas	178
Andromède	24, 181
Angle horaire	13
Année : civile	85
julienne	86
sidérale	84
tropique	59, 84
Année-lumière	168
Apex	166
Apogée	67
Apsides	67
Arcturus	24, 170
ARISTARQUE	70, 117
Ascension droite	14, 18
Astéroïdes	140
Axe du monde	8
AZAMBUJA (d')	158
Azimut	5

B

BAADE	181, 182
Balance	54
BALMER (série de)	152
Bélier	54, 72
BESSEL	167
Bételgeuse	24, 170, 171
BETHE	162, 175
BIELA (comète de)	148
BODE (loi de)	136
Bolides	150
BOGUER	36
Bouvier (le)	24
BRADLEY	71, 167

C

CAILLE (La)	91
Calendrier	86, 87, 89
Cancer	54
Canope	170
Capricorne	54
Carte du Ciel (pages 104, 105)	
CASSINI (Dominique)	135
(Jacques)	36, 52
Cassiopee	23
CAVENDISH	128

Centaure (α et proxima)	167
Céphéides	171
Cercle horaire	13
Cérés	140
Chèvre	23, 170
Chiens de Chasse	182
Chromosphère	157
Circumpolaires (étoiles)	7, 23
CLAIRAUT	36, 148
Comètes	146
CONDAMINE (La)	36
Conjonction	95
Constellations	2, 23, 24

Constitution physique :

du Soleil	155
de la Lune	103

Coordonnées :

écliptiques	57
équatoriales	14
géographiques	32
horaires	13
horizontales	5

COPERNIC	11, 121, 123
Coronographe	157
Couronne boréale	24
Couronne solaire	157
Crépuscules	65
Croix du Sud	24
Culmination	7

D

Déclinaison	13, 19
DESCARTES	36, 125
Deneb	24

Diamètre apparent :

du Soleil	66
de la Lune	92

Digression (des planètes)

Distances :

Terre-Soleil	66, 69
Terre-Lune	93
Soleil-planètes	134
Étoiles	167
Distance zénithale :	5
DOPPLER	166
Dragon	23, 72

E			
Éclipses : de Lune	105	Jour : sidéral	9, 15, 75
de Soleil	111	<i>Jupiter</i>	119, 141
Écliptique	56	K	
EDDINGTON	173	KEPLER	122, 124
EINSTEIN	137, 162, 185	KIRSCHHOFF	153
Ellipsoïde international	38	L	
Ellipsoïdes (galaxies).	182	LALANDE	31
ENCKE (comète d')	148	LAMBERT (projection de).	51
Équateur	8, 31	LAPLACE	130, 175
Équation du temps	77	Latitude	32, 35
Équatorial	12	LEMAITRE (abbé)	185
Équinoxes	56, 63	LE VERRIER	144
ÉRATOSTHÈNE	41	LEWITT (Miss)	171
<i>Éros</i>	135, 140	Libration (lune)	102
Est	8	<i>Lion</i>	54
Étoiles : catalogue	page 220	Longitude	32, 33
circumpolaires	7	LOWELL	145
classes spectrales	164	Loxodromie	50
déplacement	166	Lune (Ch. IV).	
géantes, naines	170	Lunette méridienne	17
grandeur	165	<i>Lyre</i> (la)	24
masse	173	LYOT	157
parallaxe	168	M	
polaire	7	<i>Magellan</i> (Nuages de)	182
Expansion de l'Univers	185	Magnitude	165
F		<i>Mars</i>	139
FIZEAU	166	Masse : du Soleil	131
FOUCAULT	11, 25	des Étoiles	173
FRAUNHOFER	156	de la Galaxie	179
Fuseaux horaires	79	Masse-luminosité	173
G		Matière interstellaire.	178, 184
Galaxies (Ch. VIII).		MAUPERTUIS	36
GALILÉE	123, 125, 141, 177	MERCATOR	50
GAUSS	140	<i>Mercure</i>	137
<i>Gémeaux</i>	54	Méridien	7, 8
Géοide	30, 38	Météores, météorites	150
Grandeur (des étoiles)	165	Mouvement diurne	7, 9
Gravitation universelle.	127	N	
Gyroscope	25	Nadir	4
H		Nébuleuses	178
HALLEY	135, 148, 163	NEPER	124
Hauteur	5, 8	<i>Neptune</i>	144
HAYFORD	38	NEWTON	36, 126, 129
Hélium.	157, 162	Nivellement	40
HÉRACLIDE	11	Nœuds (Lune)	90
HERSCHEL	143, 177	Nord	8
Heure	78, 79, 83	Novæ	172
HIPPARQUE	54, 72	Nutation	72
Horizon	4	O	
Horizon sensible.	28	OORT	179, 184
Horloge astronomique	16	Opposition	95
HUBBLE	181, 183	Orbite : des Comètes	147
HUYGHENS	141	de la Lune	90
HUMASSON	183	de la Terre	70, 74
J		<i>Orion</i>	24, 178
JANSSEN	157, 158	Ouest	8
Jour : durée. . . 64—moyen	77	<i>Orse</i> : Grande	3, 23
		Petite	23

P

Pâques (date)	88
Parallaxe : Lune	91
Soleil 69,	135
Étoiles 167,	169
Parsec	168
Pégase	24
Périgée	67
PERRIN (Jean)	162
Persée	23
Perturbations	130
Phases : Lune 98 à	100
Vénus	138
Saturne	142
Photosphère	155
PICARD	135
Planètes 118, 119,	136
Pléiades	178
Pluton	145
POGSON (formules de)	165
POINCARÉ (Henri)	162
Points cardinaux	8
Poissons 54,	72
Polaire (étoile) 7,	23
Pôles : célestes 8,	72
géographiques 31,	72
écliptique	72
galactique	177
Précession des équinoxes	72
Projections : orthogonale 45,	46
stéréographique 47 à	49
de Lambert	51
de Mercator	50
Protubérances	157
PTOLÉMÉE 115, 120, 123,	163

R

Radar	160, 180
Radiant (point)	150
Radiotélescope	160, 180
RAMSAY	157
Rayon : de la Terre 29,	38
du Soleil	69
de la Lune	94
Réfraction atmosphérique	19
Renversante (couche)	157
Révolution : sidérale 97,	133
synodique 96,	132
RICHER	135
Rigel	24
ROEMER	141
Rotation de la Terre	11
du Soleil	73
de la Lune	101
de la Galaxie	179
RUSSELL	161, 170

S

Saisons	60, 68,	74
Sagittaire	54,	178
Saros		115
Saturne		142
Scorpion	54,	178
Sextant		26
SHAPLEY		171
Sirius	24,	173
Soleil (Ch. III et VI)		
Solstices		56
Spectres 151 à	154	
solaire		156
des étoiles		164
Spectrohéliographe		158
Sphère céleste locale		3
des fixes		9
Station des planètes		119
STEBBINS		180
STRAND		176
STRUVE		167
Sud		8
Supernovæ		172
Systèmes : solaire (constante)		164
de Ptolémée	120,	123
de Copernic	121,	123

T

Taureau	24, 54,	72
Temps : sidéral	15, 75,	81
solaire vrai		76
solaire moyen	77,	81
civil		78
universel		79
Théodolite		6
TORRICELLI		125
Tropiques		61
TYCHO-BRAHÉ	122, 124,	163

U

Unité astronomique (UA)	69,	140
Uranus		143

V

Véga	24,	166
Vénus	119,	138
Vernal (point)		56
Verseau		54
Verticale		4
Vierge	54,	182
Vitesse : des Étoiles		166
des Galaxies		183

W

Wolf 457		173
--------------------	--	-----

Z

Zénith		4
Zodiaque		54
Zodiacale (lumière)		159
Zones géographiques		61
ZWICKY		175

BIBLIOGRAPHIE SOMMAIRE

AUTEURS	TITRES	ÉDITEURS
BARBIER.	Les Atmosphères stellaires.	<i>Flammarion.</i>
BRUHAT et D'AZAMBUJA.	Le Soleil.	<i>Presses Universitaires.</i>
BRUHAT et SCHATZMAN.	Les Planètes.	—
P. COUDERC.	Les Étapes de l'astronomie.	—
	Le Calendrier.	—
	L'Expansion de l'Univers.	—
	L'Univers.	—
	L'Architecture de l'Univers.	<i>Gauthier-Villars.</i>
DANJON.	Astronomie populaire.	<i>Flammarion.</i>
J. DELHAYE.	Astronomie stellaire.	<i>Colin.</i>
J. GAUZIT.	Vie et Mort des Étoiles	<i>Presses Universitaires.</i>
F. HOYLE.	Aux frontières de l'Astronomie.	<i>Ed. Corrêa.</i>
P. QUINTINI.	Les Planètes.	—
P. HUMBERT.	De Mercure à Pluton.	<i>Albin Michel.</i>
H. JARLAN.	Le Soleil et son Rayonnement.	<i>Presses Universitaires.</i>
M. D'OCAGNE.	Hommes et choses de Sciences.	<i>Vuibert.</i>
L. PICART.	Astronomie générale.	<i>Colin.</i>
P. ROUSSEAU.	Exploration du Ciel.	<i>Hachette.</i>
	Mars, Terre mystérieuse.	—
	Notre amie la Lune.	—
	Jean-François astronome.	—
	Le Monde des Étoiles.	—
	Notre Soleil.	—
	Satellites artificiels.	—
	L'Astronomie sans télescope.	<i>Presses Universitaires.</i>
	Découverte du Ciel.	<i>Nouvelles Éditions Latines.</i>
L. RUDAUX et de VAUCOU- LEURS.	Astronomie : les Astres, l'Univers.	<i>Larousse.</i>
P. SIZAIRE.	Le Guide des Étoiles.	<i>Grandes Éditions françaises.</i>
G. de VAU- COULEURS.	L'Esprit de l'homme à la conquête de l'Univers.	<i>Spes.</i>
	Physique de la planète Mars.	<i>Albin Michel.</i>
A. VIGER.	Le Ciel. (Collection « L'Encyclopédie par l'image ».)	<i>Hachette.</i>
<i>Périodiques.</i>	Annuaire du bureau des longitudes : L'Astronomie. (revue mensuelle et bulletin de la Société). Annuaire astronomique et météorologique.	<i>Gauthier-Villars.</i> <i>Société astronomique. de France.</i> —

TABLE

CHAPITRE PREMIER.

La sphère céleste.

1. Observation du Ciel	1
2. Sphère locale. Le mouvement diurne	4
3. Coordonnées horaires. Coordonnées équatoriales	17
4. Description sommaire du Ciel .	26
<i>Lectures</i>	30
<i>Exercices sur le chapitre premier.</i>	32

CHAPITRE II.

La Terre.

1. Forme approchée de la Terre .	33
2. Coordonnées géographiques . .	37
3. Forme de la Terre	43
<i>Lectures</i>	48
4. Cartes géographiques	50
<i>Lecture</i>	60
<i>Exercices sur le chapitre II.</i> . .	61

CHAPITRE III.

Le Soleil.

1. Déplacement apparent du Soleil.	62
2. Inégalité des jours et des nuits.	69
3. Trajectoire apparente du Soleil. Orbite terrestre	76
<i>Lecture</i>	86
4. Mesure du temps	88
<i>Lectures</i>	96
5. Le calendrier	98
<i>Lectures</i>	102
<i>Exercices sur le chapitre III</i> . .	103
Carte du Ciel	104

CHAPITRE IV.

La Lune.

1. Mouvements de la Lune	107
2. Phases de la Lune	115
3. Éclipses de Lune	124
4. Éclipses de Soleil	129
<i>Lectures</i>	140
<i>Exercices sur le chapitre IV</i> . .	142

CHAPITRE V.

Le système solaire.

1. Mouvements des planètes . . .	144
<i>Lecture</i>	153
2. La gravitation universelle . .	155
3. Dimensions du système solaire.	160
4. Monographie des planètes . . .	164
<i>Lecture</i>	173
5. Comètes. Météores	174

CHAPITRE VI.

Constitution physique du Soleil.

1. Notions d'analyse spectrale . .	181
2. Constitution physique du Soleil.	185
<i>Lecture</i>	194

CHAPITRE VII.

Les Étoiles.

1. Étude comparée des Étoiles . .	197
2. Distances stellaires	206
<i>Lectures</i>	218
Catalogue sommaire d'Étoiles .	220

CHAPITRE VIII.

Les Galaxies.

1. La Galaxie	221
<i>Lecture</i>	228
2. Nébuleuses extragalactiques . .	229
<i>Lecture</i>	236

Tableau des abréviations	238
Nombres à retenir	239
Problèmes de Baccalauréat . . .	240
Index alphabétique	245
Bibliographie	248
Table	249

Imprimé en France
par Brodard-Taupin
Imprimeur - Relieur
Coulommiers - Paris
56298-VII-10-3072
Dépôt légal n° 2139
4^e trimestre 1960
1^{er} dépôt en 1952

